



ESTUDO SOBRE EXPLOSÕES COM MATERIAL PARTICULADO: UMA ANÁLISE DO CASO DA IMPERIAL SUGAR COMPANY

CAMILA DA MATA RABELO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ORIENTADOR: CARLOS ANDRE VAZ JUNIOR, D. SC

RIO DE JANEIRO

2020

Camila da Mata Rabelo

**ESTUDO SOBRE EXPLOSÕES COM MATERIAL
PARTICULADO: UMA ANÁLISE DO CASO DA IMPERIAL
SUGAR COMPANY**

**Monografia submetida ao corpo docente da Escola de
Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do título de
bacharel em engenharia de alimentos.**

Orientador:

Carlos André Vaz Junior, D. Sc

Rio de Janeiro

2020

ESTUDO SOBRE EXPLOSÕES COM MATERIAL PARTICULADO: UMA ANÁLISE DO CASO DA IMPERIAL SUGAR COMPANY

Camila da Mata Rabelo

Monografia submetida ao corpo docente da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em engenharia de alimentos.

Aprovado por:

Carlos André Vaz Junior, D. Sc. – Orientador

Ana Lúcia do Amaral Vendramini, D. Sc - UFRJ

Suely Pereira Freitas, D. Sc- UFRJ

Natalia Lobo – Engenheira de segurança do trabalho

Rio de Janeiro

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Rabelo, Camila da Mata

Estudo sobre explosões com material particulado: uma análise do caso da Imperial Sugar Company /Camila da Mata Rabelo. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020.

88 p.: il. color.; 30 cm.

Orientador: Carlos André Vaz Junior

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020. Bibliografia: p. 84-87.

1. Explosão de pó em indústrias. 2. Estudo de caso da Imperial Sugar. 3. Acidentes envolvendo manuseio de pó. 4. Monografia. (Graduação - UFRJ/EQ). I. Vaz Junior, Carlos André. (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Química. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, que me proporcionou o imenso privilégio de vir a esta terra com pais maravilhosos, que sempre priorizaram a minha educação, mesmo com toda dificuldade. Minha mãe, Vania, e meu pai, Jorge, sempre foram meus grandes parceiros para tudo que enfrentei. Sempre estiveram comigo, me apoiando, me dando forças quando eu achava que tudo estaria perdido e me enchendo de esperança e amor. Por isso e por tudo mais que fizeram por mim, a minha eterna gratidão: saibam que o diploma de Engenharia de Alimentos nunca será só meu, será nosso.

Agradeço também ao meu orientador, Carlos André Vaz Junior, que me ajudou imensamente a realizar este trabalho e ao qual possuo grande admiração e respeito.

Aos mestres que me guiaram ao longo da graduação, ensinando com paciência e entusiasmo. Em especial a Ana Lúcia Vendramini, Suely Pereira Freitas e Antonio Carlos de Oliveira Guerra, que me inspiraram enormemente, sendo excelentes exemplos de mestres, deixando marcas profundas em minha vida que levarei no coração.

Aos funcionários administrativos da Escola de Química que sempre me auxiliaram em situações nas quais me via perdida. Em especial a Adeilson Pereira da Silva, que sempre trata todos os alunos com bom humor e completamente disposto a ajudar.

Gostaria também de agradecer aos amigos que trilharam este caminho comigo, me dando todo suporte, estando ao meu lado nos momentos mais difíceis e entendendo as minhas muitas ausências, porque precisava estudar. Em especial a Sarah Fernandes, Natasha Stéphanie e Paula Campos, sem as quais o percurso da graduação teria sido incrivelmente triste e muito mais difícil.

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus, que sempre me abençoou e
me guardou.

Aos meus pais, Jorge e Vania, pelo amor e imensurável
dedicação de sempre me proverem o melhor.

RESUMO

Explosões com material particulado podem ocorrer em vários segmentos da indústria, incluindo a indústria agroalimentar. Normalmente, essas explosões ocorrem em cadeia, tendo potencial de varrer toda a instalação. São eventos capazes de tirar vidas e causar grandes danos estruturais e que continuam ocorrendo com o passar dos anos. Além disso, muitas vezes o risco de ocorrência de explosões não é reconhecido, o que leva a negligências no processo, gerando acidentes. Muitos fatores influenciam na probabilidade de uma ocorrência, tais como a concentração do material particulado, sua granulometria, umidade do local, a quantidade de comburente disponível, o confinamento ao qual o conjunto está submetido e a presença de alguma fonte de ignição. Neste trabalho são apresentados métodos e tecnologias desenvolvidos para mitigar os riscos e evitar acidentes, tais como o projeto adequado da planta, instalação de sistemas de ventilação, purga ou inertização, práticas de limpeza, ventilação por alívio, supressão e isolamento. Realiza-se ainda o estudo de caso do acidente ocorrido na indústria Imperial Sugar em 2008, baseado no relatório oficial emitido pela Chemical Safety Board (CSB), órgão americano responsável pela investigação do evento. É elaborada também uma análise das prováveis causas, correlacionando-as com os conceitos abordados ao longo do texto.

Conclui que os possíveis fatores responsáveis pelo acidente poderia ter sido evitados com a implantação de uma cultura de segurança mais sólida dentro da empresa. Tal cultura deveria envolver uma rotina regular de manutenção e *housekeeping* (práticas de limpeza), treinamento dos funcionários, melhor planejamento estrutural da planta e instalação de tecnologias de segurança adequadas.

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CSB	United States Chemical Safety Board
DDT	Deflagration to Detonation Transition
EUA	Estados Unidos da América
LEL	Lower Explosion Limit
LFL	Lower Flammability Limit
LOC	Limiting Oxygen Concentration
MEC	Minimum Explosive Concentration
MIE	Minimum Ignition Energy
MIT	Minimum Ignition Temperature
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NFPA	National Fire Protection Association
OSHA	Occupation Safety and Health Administration

Lista de Figuras

Figura 1 – Acidentes ocorridos no Reino Unido entre os anos de 1979 e 1988, por ramo industrial	19
Figura 2 – Acidentes ocorridos no Estados Unidos entre os anos de 1980 e 2005, por ramo industrial	20
Figura 3 – Acidentes ocorridos na França entre os anos de 2000 e 2008, por ramo industrial	20
Figura 4 – Acidentes ocorridos na China entre os anos de 1981 e 2011, por ramo industrial	21
Figura 5 – Acidentes ocorridos na China, por ramo industrial, por períodos.....	21
Figura 6 – Triângulo de fogo	24
Figura 7 – Tetraedro de fogo	25
Figura 8 – Triângulo de fogo para poeiras	27
Figura 9 – Pentágono de fogo	27
Figura 10a – Mecanismo da explosão primária de poeira	32
Figura 10b – Mecanismo da explosão secundária de poeira	32
Figura 10c – Mecanismo da transição para detonação	33
Figura 11 – Processo de detonação e deflagração	33
Figura 12 – Pressão máxima e a variação máxima de pressão usando uma esfera de 20 litros	35
Figura 13 – Dispositivo usado para coletar dados sobre explosões com poeira	36
Figura 14 – Curva típica de dados oriundos da E1226 para pressão e aumento de taxa de pressão para explosões com	38
Figura 15 – Aumento de pressão e taxa de pressão versus concentração, oriundos da E 1226	39
Figura 16 – Comparação entre combustão de madeira em diversos tamanhos	42
Figura 17 – Influência da área específica superficial da poeira de alumínio na máxima taxa de variação de pressão em um reservatório padrão de 1m ³	43

Figura 18 – Dependência entre tamanho de partícula e pressão máxima (figura superior) e variação de pressão máxima (figura inferior)	44
Figura 19 – Variação de pressão usando variados tamanhos de partículas, com 4 diferentes materiais	45
Figura 20 – Dependência entre mínima concentração explosiva e diâmetro da partícula	46
Figura 21 – Influência do conteúdo de mistura de poeira na mínima energia de ignição, via faísca elétrica, para 3 tipos de pós	50
Figura 22 – Mecanismo da ventilação por explosão	57
Figura 23a – Primeira etapa da supressão	59
Figura 23b – Segunda etapa da supressão	59
Figura 23c – Terceira etapa da supressão	60
Figura 23d – Quarta etapa da supressão	60
Figura 23e – Final da supressão	60
Figura 24 – Detector de pressão do tipo membrana	61
Figura 25 – Transportador de parafuso	62
Figura 26 – Sistema de movimentação entre os silos da Imperial Sugar	65
Figura 27 – Túnel abaixo dos silos	67
Figura 28 – Empedramento de açúcar na saída do silo 1 servindo de barreira para a passagem do açúcar (antes do fechamento da correia transportadora)	70
Figura 29 – Túnel subterrâneo antes do fechamento da correia transportadora	71
Figura 30 – Túnel subterrâneo após o fechamento da correia transportadora	71
Figura 31 – Empedramento de açúcar na saída do silo 1 servindo de barreira para a passagem do açúcar (após o fechamento da correia transportadora)	72
Figura 32 – Parede destruída e arremessada para o edifício de empacotamento da Imperial Sugar	73
Figura 33 – Acúmulo de material particulado próximo aos equipamentos de empacotamento	74
Figura 34 - Acúmulo de material particulado próximo ao Moinho	74

Figura 35 - À esquerda, acúmulo de poeira no motor da correia transportadora do túnel (Imperial Sugar Co., foto de outubro de 2006) e à direita, amido de milho derramado abaixo de seu silo de armazenamento (Imperial Sugar Co., foto de março de 2008) 75

Figura 36 - Curva de Bradley 81

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Terminologias utilizadas na categoria de pós alimentícios	26
Tabela 2 - Classificação St de poeiras segundo seu índice de deflagração ...	37
Tabela 3 - Resultados obtidos a partir do material coletado da planta de Port Wentworth	76

SUMÁRIO

1. Introdução	14
1.1 Questão de pesquisa	14
1.2 Objetivos	15
1.3 Motivação	16
1.3.1 Histórico acidental envolvendo explosões com material particulado	16
2. Fundamentos teóricos das explosões com pós	23
2.1 Incêndios e explosões	23
2.2 Incêndios e explosões com pós	25
2.3 Mecanismo	30
2.4 Características	33
3. Fatores de risco para explosões	40
3.1 Concentração	40
3.2 Tamanho da partícula	41
3.3 Ignição	47
3.4 Umidade	48
3.5 Composição da mistura: material e oxidante	49
4. Métodos de redução de danos	52
4.1 Métodos de preventivos	52
4.1.1 Projeto da planta	52
4.1.2 <i>Housekeeping</i> - Práticas de limpeza	53
4.1.3 Sistemas de ventilação por Exaustão	54
4.1.4 Purga e inertização	55
4.2 Métodos corretivos	56
4.2.1 Ventilação de alívio	56
4.2.2 Supressão	58
4.2.3 Isolamento	62
5. Estudo de caso: Imperial Sugar Company	64
5.1 Sobre a empresa	64
5.2 Área de processo	65
5.3 Edifícios de empacotamento	66
5.4 O acidente	68
5.5 Investigação das causas do acidente	69
5.6 Análise do caso	77
6. Conclusão	82
Referências	84
Anexo A - Parâmetros de pós alimentícios comuns	88

Capítulo 1. Introdução

A importância do tema segurança de processos tem aumentado consideravelmente na atualidade. Incêndios e explosões são acidentes que, além de causar grandes danos ao ser humano, geram prejuízos materiais e ambientais. Há ainda um grande impacto negativo na imagem da empresa, o que pode gerar prejuízos financeiros de longo prazo. A credibilidade de uma marca passa pela sua preocupação com a segurança e bem estar de seus funcionários dentro de suas instalações.

Por esses motivos, muitos pesquisadores se dedicam a estudar as causas e consequências de acidentes, buscando identificar novas formas de evitar esses eventos. No caso de incêndios e explosões, muitos produtos podem se tornar agentes combustíveis, independentes de serem sólidos, líquidos ou gasosos. Alguns agentes combustíveis não são reconhecidos como tal pelo senso comum. É o caso de pós de grãos usados na indústria de alimentos e na agroindústria. Para muitos, não é intuitivo o fato de que uma nuvem de açúcar, por exemplo, possa ser explosiva. Portanto, é de suma importância o desenvolvimento de trabalhos que reforcem a relevância do tema. Deve-se divulgar ao máximo os riscos e possíveis consequências geradas por tais acidentes. Além disso, as indústrias devem garantir que seus funcionários sejam devidamente treinados por profissionais de segurança capacitados, sabendo reconhecer e mitigar os riscos.

1.1 Questão de pesquisa

O presente trabalho se propõe a estudar o fenômeno das explosões de material particulado. O texto aborda os conceitos, mecanismos e fatores de riscos envolvidos, bem como expõe os danos materiais e humanos. Além disso, mostra alguns métodos preventivos e corretivos, capazes de reduzir e até evitar tais danos. Finalmente, busca correlacionar esses dados teóricos com o relatório oficial de investigação do acidente ocorrido na refinaria de açúcar Imperial Sugar Company, no Estados Unidos, servindo de estudo de caso. A partir deste relatório e do arcabouço teórico encontrado na literatura, o presente estudo buscou encontrar respostas para a seguinte questão:

Quais os fatores envolvidos nas causas do acidente da Imperial Sugar Company e quais medidas de prevenção poderiam ter sido adotadas para evitar ou diminuir os danos causados aos seres humanos e as instalações industriais?

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar um estudo sobre explosões com material particulado.

Os objetivos específicos são:

- a) Apresentar os conceitos de incêndios e explosões;
- b) Expor as definições de incêndios e explosões com pós, observando suas especificidades;
- c) Construir uma fundamentação teórica sobre incêndios e explosões com material particulado, explicando seus mecanismos de geração e propagação, e o comportamento das variáveis físico-químicas presentes na propagação dos mesmos;
- d) Enumerar os fatores de riscos de explosões com material particulado, elucidando a influência de cada um dos fatores nos respectivos fenômenos;
- e) Descrever formas de prevenção, levando em conta as metodologias e instrumentos de proteção recomendados para os seres humanos (funcionários), como também para os equipamentos presentes na área de processo;
- f) Fazer um estudo de caso do acidente ocorrido na Imperial Sugar Company, por meio do relatório oficial de investigação emitido pela Chemical Safety Board, explicitando as possíveis causas do acidente.
- g) Analisar as possíveis causas do acidente da Imperial Sugar, correlacionando com a base teórica construída ao longo do trabalho.
- h) Identificar condutas que poderiam ter sido tomadas para evitar o acidente ou minimizar suas consequências.

1.3 Motivação

Como motivação para a realização deste trabalho, tem-se a grande quantidade de acidentes envolvendo explosões com pó, inclusive de produtos alimentícios, ao redor do mundo. As explosões provocam inúmeros danos à saúde, os quais vão desde queimaduras, até lesões por esmagamento ou compressão devido a onda de choque produzida. Além disso, há ainda o efeito dos gases formados na explosão que, ao serem inalados, podem intoxicar e até asfixiar a vítima. Deve-se considerar também o efeito psicológico nos sobreviventes, os quais podem apresentar traumas devido ao evento presenciado. A recorrência de casos de explosões e a gravidade das suas consequências foram propulsores da busca pela compreensão destes eventos. A pesquisa de acidentes ocorridos ao longo dos anos encorajou a procura pelo entendimento das causas, como também de possíveis métodos de redução de danos. Um breve histórico de casos é apresentado a seguir.

1.3.1 Histórico acidental envolvendo explosões com material particulado

Em janeiro de 1992, ocorreu uma explosão no silo de cevada do Porto Paranaguá, em Curitiba, no Brasil. O silo tinha 13 andares, equivalente a 55 metros. O acidente provocou a morte de dois funcionários e feriu outros cinco. A principal suspeita é que foi gerada uma combustão da poeira da cevada enquanto era realizada uma operação de limpeza (RANGEL JR, 2008).

Um ano depois, também no Paraná, uma explosão atingiu o túnel subterrâneo de expedição de grãos da Cooperativa Agrícola Vale do Piqueri (Coopervale). O impacto deslocou o túnel seis metros acima do subsolo, ceifando a vida de quatro trabalhadores e ferindo outros seis (RANGEL JR, 2008).

Em dezembro de 1995, na planta da Malden Mills Industries, localizada em Methuen, no Estados Unidos, um grave acidente ocorreu ferindo mais de 20 funcionários e gerando danos materiais de cerca de US\$500 milhões. Acredita-se que a explosão teria surgido no local onde se utilizavam mangueiras de ar comprimido para limpar um equipamento. O jato de ar teria suspenso poeira

de fibra de nylon no local. A ignição teria sido causada por uma faísca do sistema elétrico da sala (FRANK, 2004).

Em 1997, uma explosão ocorrida no terminal graneleiro de Semabla, em Blaye, na França, foi responsável pela morte de onze trabalhadores. O complexo armazenava milho, cevada e trigo (RANGEL JR, 2008).

Em fevereiro de 1999, a Jahn Foundry, em Springfield, Estados Unidos, sofreu com explosões que feriram 12 funcionários, três dos quais acabaram sendo vítimas fatais. Durante as investigações, foram detectadas duas possíveis causas: uma envolvendo o acúmulo de uma mistura de ar com gás natural em um dos fornos e outra oriunda de uma nuvem de pó de resina ignificada pelo forno quente. A explosão teria se propagado através da tubulação e as vibrações teriam suspenso mais poeira de resina de formaldeído depositada nas superfícies externas. É possível que aberturas no duto tenham permitido a saída de chamas que acabaram por inflamar as nuvens de pó do ambiente, provocando explosões secundárias no edifício (FRANK, 2004) .

Ainda em 1999, o Complexo de Rouge (Ford Rouge), Dearborn, Michigan da Ford Motor Company, foi palco de um acidente, que levou 6 trabalhadores a óbito e outros 14 a graves ferimentos. Com danos de instalações estimados em US \$ 1 bilhão, este foi um dos acidentes mais caros dos EUA. Após a realização de inspeções foram descobertos acúmulos de poeira que apresentavam depósitos de até 2,54 cm de espessura com faixas de 800 a 3800 g / m² em pisos e vigas suspensas (FRANK, 2004).

Em novembro de 2001, o depósito de grãos da empresa Coimbra, no porto de Paranaguá, Paraná, Brasil, foi assolado por uma explosão. Felizmente o acidente não causou nenhuma fatalidade, mas deixou dezoito pessoas feridas. Acredita-se que o acidente pode ter ocorrido devido a limpeza ineficiente das esteiras transportadoras de grãos (RANGEL JR, 2008).

Na cidade de Vicksburg, no Estados Unidos, um acidente aconteceu em 2002 na Rouse Polymerics International. A empresa reciclava elastômeros, produzindo um fino pó de borracha. A explosão feriu 11 trabalhadores, 5 dos quais faleceram devido a graves queimaduras. O acidente foi responsável pela perda total de bens materiais e estruturais da planta. Acredita-se que faíscas

tenham escapado de um tubo exaustor de forno, caindo no telhado, onde teria provocado o incêndio inicial. Este teria se espalhado para cômodos adjacentes, onde havia acúmulo de poeira, provocando sua suspensão e, com isso, explosões. A Occupation Safety and Health Administration (OSHA) acusou a empresa por 24 violações de segurança, duas das quais foram: acúmulo de poeira combustível na planta e uso de equipamento não adequado para áreas classificadas. Ao final da negociação, a Rouse Polymeric International teve de pagar multas superiores a US\$187,000 (FRANK, 2004).

Em janeiro de 2003, houve uma explosão na West Pharmaceuticals, Kinston, no Estados Unidos, que resultou em 6 mortes e dezenas de feridos. O pó envolvido era de polietileno, utilizado para revestir tiras de borracha, em uma operação conhecida por criar uma suspensão do material no ar. A fábrica seguia um plano rigoroso de limpeza, porém, uma falha grave na avaliação de riscos fez com que o desastre ocorresse: a construção de um teto suspenso na área produtiva. Nele se acumulavam camadas de poeira e este não era incluído no plano de limpeza em vigor. A explosão foi um evento particularmente violento, com detritos encontrados a até 3 km da instalação (FRANK, 2004).

Embora questões importantes ainda não tenham sido respondidas, resultados preliminares da investigação, compartilhados em uma recente reunião pública em Kinston, indicam fortemente que a explosão teve origem nas proximidades de uma das usinas e sua linha de remessa adjacente. Marcas de queimadura observadas apenas na parte superior dos painéis do teto sugerem que ocorreu a explosão neste espaço acima do teto suspenso (FRANK, 2004, p. 175).

No mesmo ano, em fevereiro, outro desastre ocorreu, dessa vez em Corbun, no Estados Unidos, na CTA Acoustics. O acidente feriu 44 funcionários, 7 dos quais morreram depois por queimaduras. Resultados preliminares da Chemical Safety Board (CSB) indicam que a explosão inicial e incêndio ocorreram em uma linha de produção parcialmente desligada para limpeza (FRANK, 2004).

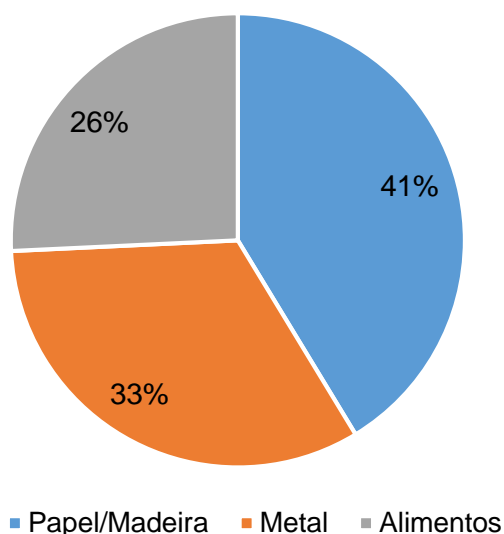
Acredita-se que uma nuvem espessa dispersa pelas atividades de limpeza, foi acesa pelas chamas de um forno, cuja porta foi deixada aberta (investigadores da CSB relataram que a instalação tinha um histórico de pequenos incêndios nos fornos, que rotineiramente eram extintos pelo operador) (FRANK, 2004, p. 177).

Em outubro de 2003, uma grande explosão ocorreu na Hayes Lemmerz International (Hayes) em Huntington, envolvendo pó de alumínio. O acidente foi responsável pela morte de um funcionário e ferimento de outros seis (FRANK, 2004).

No ano de 2008, uma série de explosões com pó tomou a fábrica de açúcar Imperial Sugar em Port Wentworth, Georgia, tirando a vida de 14 funcionários e ferindo gravemente 36 outros, dos quais alguns tiveram consequências físicas permanentes. Esse caso será estudado de forma aprofundada no capítulo 5 deste trabalho.

No Reino Unido, entre os anos de 1979 e 1988, foram 167 casos de explosões com pós reportados, dos quais 69 causados por papel/madeira, 55 por poeira metálica e outros 43 por produtos alimentícios. Tais números são apresentados na figura 1 (PAK et al, 2019).

Figura 1. Acidentes ocorridos no Reino Unido entre os anos de 1979 e 1988, por ramo industrial



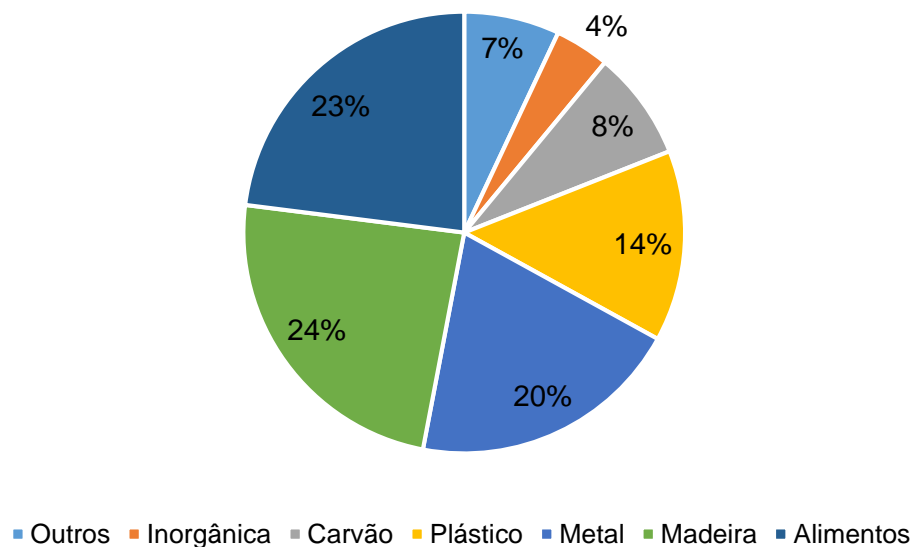
Fonte: Adaptado de Pak et al (2019)

Já nos Estados Unidos, entre os anos de 1980 e 2005, ocorreram 281 acidentes envolvendo explosões com materiais particulados. A figura 2 mostra a distribuição dos tipos de poeira combustíveis causadoras destes 281 acidentes, mostrando que o setor alimentício foi responsável por 23% dos casos. (BLAIR, 2007). Apenas no ano de 2016, ocorreram 31 acidentes devido a explosões com pó. Dentre eles, mais de 60% envolveram materiais alimentícios e madeira. No

ano seguinte, 145 casos ocorreram, dos quais 55% tinham origem em alimentos e madeira (PAK et al, 2019).

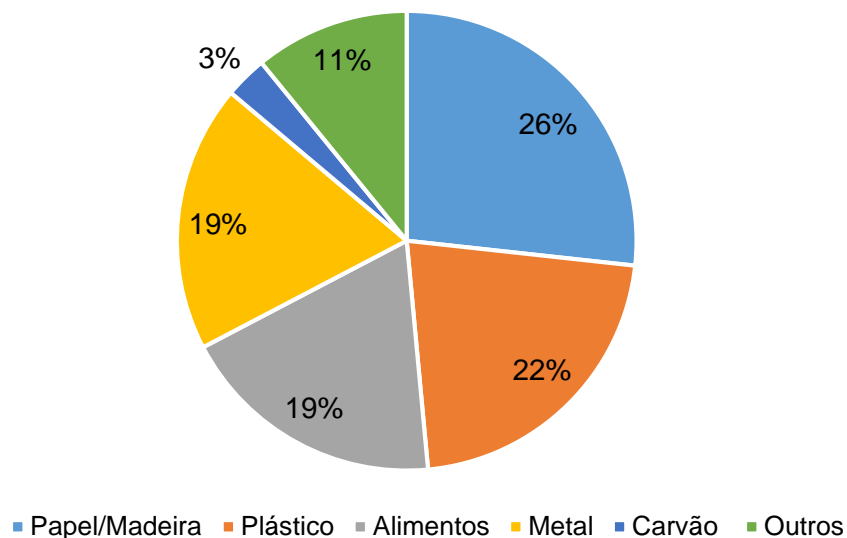
Na França, de 2000 a 2018, dentre 37 casos de explosões com pó apresentados por Pak et al (2019), 27% envolveram produto madeireiro, 22% plástico, 19% produtos alimentícios, 19% metais, 3% carvão, e 11% outros tipos diversos de materiais. Tais números são apresentados na figura 3 (PAK et al, 2019).

Figura 2. Acidentes ocorridos no Estados Unidos entre os anos de 1980 e 2005, por ramo industrial



Fonte: Adaptado de Blair (2007)

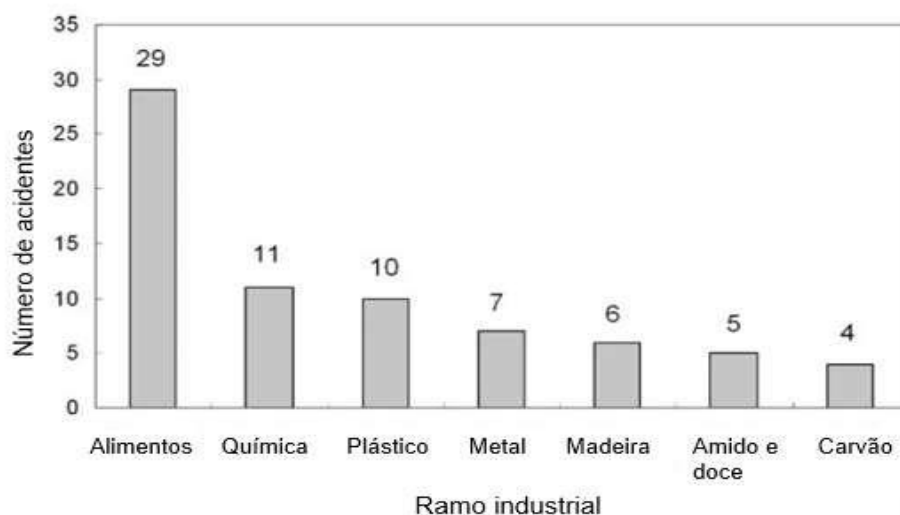
Figura 3. Acidentes ocorridos na França entre os anos de 2000 e 2008, por ramo industrial



Fonte: Adaptado de Pak et al (2019)

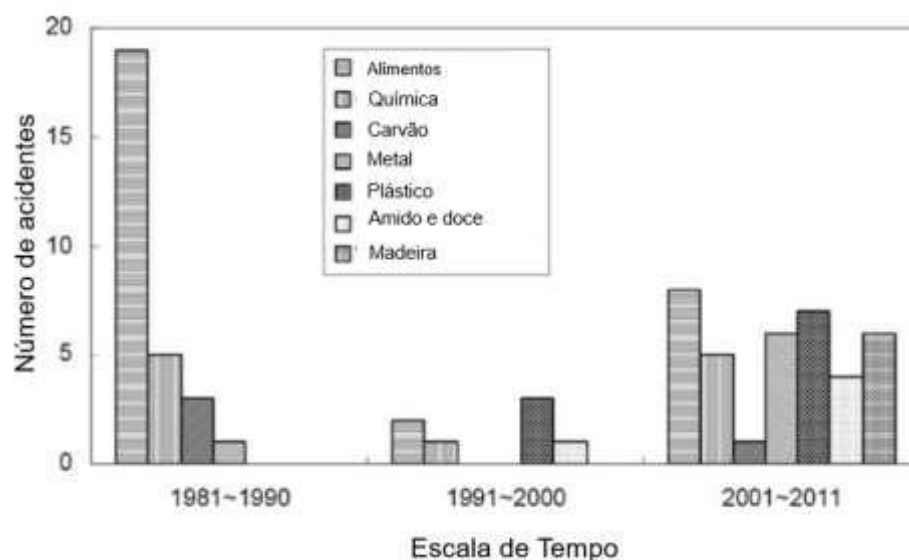
Yan e Yu (2012) estudaram os acidentes ocorridos da China nos últimos 30 anos. A figura 4 mostra o número de acidentes por segmento industrial, mostrando que a indústria de alimentos foi responsável por 40% dos eventos no país. O número de acidentes ocorridos entre 2001 e 2011 foi maior do que entre os anos de 1991 e 2001, como observa-se na figura 5 (YAN, YU, 2012).

Figura 4. Acidentes ocorridos na China entre 1981 e 2011, por ramo industrial



Fonte: Adaptado de Yan e Yu (2012)

Figura 5. Acidentes ocorridos na China, por ramo industrial, por períodos



Fonte: Adaptado de Yan e Yu (2012)

Percebe-se então a relevância de um estudo que aborde explosões com pós, principalmente para reforçar o potencial de risco gerado por materiais que muitas vezes não são identificados como combustíveis, como é o caso de grãos e outros produtos alimentícios. Através dos números apresentados por Pak et al (2019), confirma-se que explosões com pó são frequentes em indústrias de alimentos, representando, por exemplo, a maioria das ocorrências nos Estados Unidos (PAK et al, 2019). Dessa forma, saber avaliar os riscos é requisito essencial para profissionais da engenharia de alimentos.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos das explosões com pós

2.1 Incêndios e explosões

Incêndio e explosão são conceitos diferentes, que no entanto apresentam algumas similaridades. Incêndio é “uma reação química na qual uma substância combustível se combina com um oxidante e libera energia. Parte da energia liberada é usada para sustentar a reação” (Crowl e Louvar, 2002, p. 227). Lees (1996) define:

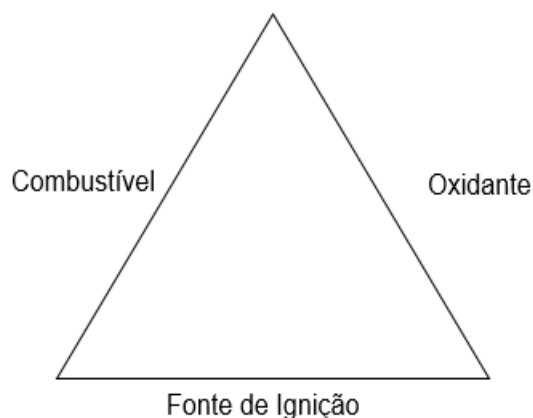
O incêndio, ou combustão, é uma reação química na qual uma substância se combina com oxigênio e o calor é liberado. [...] Se um líquido ou sólido combustível é aquecido, ele produz vapor, e se a concentração de vapor for alta o suficiente, forma-se uma mistura inflamável com o oxigênio do ar. Se essa mistura inflamável for aquecida até seu ponto de ignição, a combustão começará (LEES, 1996, p. 16).

Já o conceito de explosão é definido por Crowl e Louvar (2002, p. 228) como “uma rápida expansão de gases, resultando em uma pressão que se move rapidamente”. Por outro lado, Lees (1996, p. 351) explica explosão como “uma liberação violenta e repentina de energia. A violência da explosão depende da taxa de energia liberada”.

O incêndio se propaga em área não confinada, na qual o calor se dissipa, não causando aumento repentino de pressão. Já a explosão tem como característica o confinamento e o rápido aumento de pressão, com consequentes ondas de choque produzidas pela alta taxa de energia liberada.

Uma forma simplificada de ilustrar o acontecimento de um incêndio é o triângulo de fogo, mostrado na figura 6, que “identifica os três componentes necessários do incêndio: combustível (substância que será oxidada), calor (suficiente para fazer o combustível queimar por meio da geração de uma fonte de ignição) e ar (oxigênio)”. A queima ocorre até que um ou mais componentes do triângulo sejam retirados do sistema.

Figura 6. Triângulo de fogo

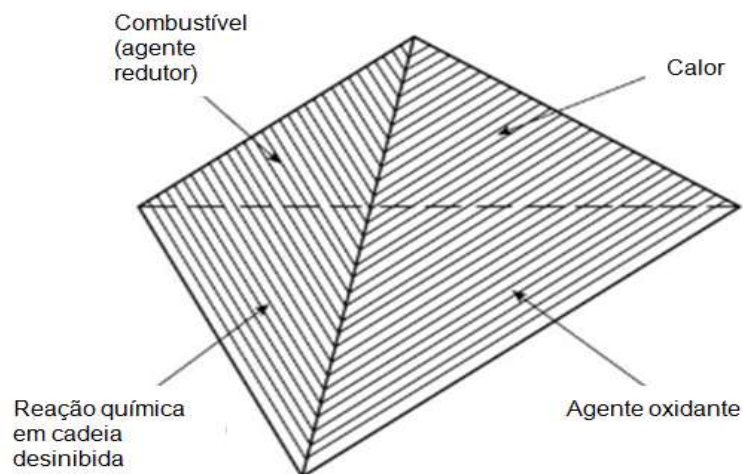


Fonte: Adaptado de Amyotte e Eckhoff, 2010, p. 19

Geralmente o incêndio cresce e se espalha através da queima direta, consequência do impacto da chama em materiais combustíveis, por meio da transferência de calor ou deslocamento, se o material estiver queimando. Os fenômenos de condução, convecção e radiação são significativas na transferência de calor de incêndios (LEES, 1996).

É possível ainda adicionar um quarto componente, surgindo o tetraedro de fogo: a reação em cadeia, que retorna o calor ao combustível, sendo capaz de manter o fogo (NFPA, 2019). A queima de um combustível ocorre pela quebra de sua molécula em moléculas cada vez menores. Essa quebra sequencial ocorre em inúmeras etapas até atingir os produtos finais, gás carbônico e água, no caso de uma combustão completa. Cada uma dessas etapas constitui uma reação química diferente e é a sequência delas que é chamada de “reação em cadeia”. O tetraedro de fogo, ilustrado na figura 7, representa o encadeamento da reação química de combustão.

Figura 7. Tetraedro de fogo



Fonte: Adaptado de NFPA, 2019

2.2 Incêndios e Explosões com pós

Existem tipos diferentes de incêndios e explosões dependendo das características dos materiais combustíveis. Um desses tipos são os eventos envolvendo material particulado, também chamado de poeira.

Poeira é definida como “qualquer sólido finamente dividido, de no máximo 420 micrometros ou 0,016 polegadas (que é um material capaz de passar através de uma peneira padrão 40 mesh)” (NFPA 68, 2002 apud CROWL, 2003, p.43).

São usadas diferentes nomenclaturas para indicar os sólidos particulados a granel, como pó, grânulos, farinha e poeira. Tais terminologias se diferenciam de acordo com o tamanho ou a fonte dos materiais. Apesar disso, todos esses materiais podem ser classificados na categoria de pó. Por exemplo, os grânulos apresentam dimensões da ordem dos milímetros, enquanto os produtos em pó finos são de tamanho médio inferior a 100 μm , como pode-se observar na Tabela 1 (BHANDARI, 2013).

Tabela 1. Terminologias utilizadas na categoria de pós alimentícios

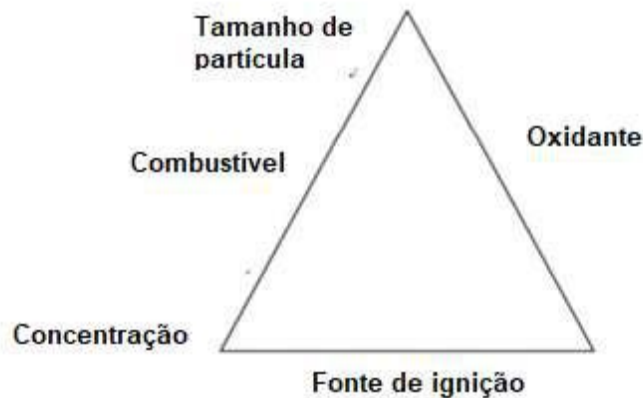
Terminologia	Tamanho da partícula (µm)	Exemplos	Características
Pó	50 - 200	Leite em pó, café em pó, corante	Mais coesas, alta densidade
Grânulos	200 - 4000	Café solúvel, semolina, alho em pó	Pó de fluxo livre, baixa densidade
Farinha	100 - 5000	Farinha de trigo, farinha de soja	Partículas de forma irregular, grandes, baixa fluidez
Poeira	5 - 100	Qualquer pó	Mais finas do que o tamanho desejado, normalmente se dispersa durante o processo

Fonte: Adaptado de Bhandari (2013)

Crowl (2003) e Benson (2012), explicam o processo que torna a poeira capaz de incendiar e explodir: o acúmulo do material ocorre por meio da deposição em camadas, geralmente sobre uma superfície quente de equipamentos, gerando nestes um isolamento térmico. Assim, o equipamento passa a apresentar temperaturas mais altas, o que aumenta a probabilidade de ignição e consequente combustão. Em áreas abertas, o processo de acúmulo do pó em camadas, associado ao oxigênio da atmosfera e a uma fonte de ignição, é suficiente para causar um incêndio. No caso de explosão, as “partículas de poeira podem arrastar o ar formando uma nuvem de poeira combustível”, sendo a severidade da explosão aumentada de acordo com o nível de confinamento da área.

De acordo com Amyotte e Eckhoff (2010), os requisitos exclusivos para combustão de um pó são: a poeira do material deve ser combustível, estar em suspensão, estar com concentração dentro da faixa explosiva e apresentar uma distribuição de tamanho de partícula capaz de propagar a chama quando dispersas em uma nuvem. A figura 8 ilustra essa dependência, posicionando em cada lado do triângulo os componentes básicos do triângulo de fogo, adicionando, no entanto, dois outros fatores referentes ao combustível, que são exatamente a concentração de pó e o tamanho da partícula.

Figura 8. Triângulo de fogo para poeiras



Fonte: Adaptado de Amyotte e Eckhoff, 2010, p. 19

Segundo a Occupational Safety and Health Administration (OSHA), se além dos elementos do triângulo de fogo, a poeira combustível apresentar um determinado tamanho de partícula e estiver dispersa em concentração suficiente, pode ocorrer uma rápida combustão. Caso o conjunto esteja ainda confinado, pode haver um aumento da pressão gerando uma explosão. Esses cinco fatores (oxigênio, calor, combustível, dispersão e confinamento) são conhecidos como o "Pentágono da Explosão de Poeira", ilustrado na figura 9. Se um elemento do pentágono estiver ausente, uma explosão não poderá ocorrer (CHIBBARO, 2019).

Figura 9. Pentágono de fogo



Fonte: Adaptado de Chibbaro, 2019

A figura 9, que ilustra o pentágono de fogo, demonstra a dependência da explosão de poeira à presença do pó (que é o combustível), do oxigênio (que aqui representa comburentes em geral) e da dispersão desses dois últimos entre si, isto é, que o pó esteja suspenso no comburente. Apresenta ainda a necessidade de calor para ignificar a mistura e o confinamento dos componentes.

Para ocorrer uma explosão com danos que causem sobrepressão, é necessário algum nível de confinamento para impedir a expansão dos produtos de combustão quentes, causando um aumento de pressão. O confinamento pode ser causado pelo invólucro do equipamento, como um coletor de pó, pelas paredes de um prédio ou por uma forte congestão na área. Além dos danos térmicos causados por um incêndio repentino, uma explosão de poeira pode causar o colapso de equipamentos e edifícios (MYERS, IBARRETA, 2013).

Segundo Amyotte e Eckhoff (2010), a formação da suspensão de pó e oxidante é um pré-requisito essencial para a explosão de poeira. Quando ocorre a combustão dessa mistura suspensa, o confinamento (parcial ou completo) permite que uma sobrepressão se desenvolva. Essa sobrepressão promove a transição do processo de combustão de queima rápida para uma explosão de poeira.

Por meio da termodinâmica é possível compreender os elementos e os conceitos envolvidos nesse processo. Segundo Smith, Van Ness e Abbott (2013), o calor pode ser definido como energia em trânsito. A energia na forma de calor é armazenada não como calor, e sim como energia cinética e potencial dos átomos e das moléculas que formam o sistema. Considera-se como sistema “a região na qual o processo ocorre” e como vizinhança “tudo com o que o sistema interage”. A fronteira do sistema pode ser real ou imaginária, rígida ou flexível. Para qualquer processo, a Primeira Lei da Termodinâmica exige que:

$$\Delta(\text{Energia do sistema}) + \Delta(\text{Energia da vizinhança}) = 0 \quad [1]$$

Onde Δ significa variações finitas das quantidades entre parênteses. No ambiente industrial os sistemas são abertos, pois são processos nos quais a matéria atravessa a fronteira do sistema. No entanto, “as leis de conservação de massa e energia se aplicam à todos os processos, tanto a sistemas fechados quanto abertos. Na realidade o sistema aberto inclui o sistema fechado” (SMITH, VAN NESS, ABBOTT, 2013).

Ainda segundo Smith, Van Ness e Abbott (2013), adicionar calor a uma substância aumenta sua atividade molecular, causando assim o acréscimo a sua energia interna. A energia interna de uma substância refere-se à energia das moléculas que a compõem, em função do seu movimento incessante, e pode variar com a alteração de calor ou de trabalho (SMITH, VAN NESS, ABBOTT, 2013).

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, o calor flui do corpo com maior temperatura para outro de menor temperatura, buscando o equilíbrio entre os dois. A segunda Lei aborda ainda o conceito de entropia, muito importante para o tema principal deste trabalho que é explosões com material particulado. Define-se entropia como uma propriedade intrínseca de certo sistema, relacionada às coordenadas mensuráveis que o caracterizam (SMITH, VAN NESS, ABBOTT, 2013). Já segundo Atkins e Jones (2010), a entropia é uma função de estado que mede a desordem do sistema. Pode se apresentar de duas formas: entropia térmica, que é a desordem proveniente de movimentos térmicos das moléculas, ou entropia de posição, causada pela expansão do volume da matéria ou de sua mistura com outra substância (ATKINS, JONES, 2010).

Por meio dos conceitos físico químicos e das primeira e segunda leis da termodinâmica, é possível compreender os fenômenos de incêndios e explosões que ocorrem na indústria. Dessa forma, podem ser feitas algumas correlações:

- O sistema pode ser um depósito de camadas de pó sobre um equipamento, ou uma nuvem de poeira em suspensão no ar dentro de uma tubulação, por exemplo.
- A vizinhança é o que envolve o sistema, ou seja, tudo que está do lado de fora da fronteira do sistema. Por exemplo, se o sistema for um trecho de

determinada tubulação, a vizinhança poderia ser todo o entorno deste trecho.

- O calor adicionado ao sistema, que constitui a fonte de ignição, pode ter inúmeras origens, sendo uma delas o aumento de temperatura de um rolamento, por exemplo.

Os incêndios e as explosões industriais apresentam características de sistemas abertos, pois as suas respectivas fronteiras são atravessadas por uma variação de energia, que é dissipada nas suas vizinhanças, seja de maneira gradual ou abrupta.

2.3. Mecanismo

As explosões com pós podem ocorrer em duas ou mais etapas. A primeira compreende uma explosão que pode ser pequena e que não necessariamente envolve poeira. Nesta primeira etapa, o material particulado, já presente no ambiente, é suspenso e misturado com o ar, criando uma nuvem combustível. Já o segundo estágio da explosão envolve esta suspensão de poeira formada na primeira etapa, sendo frequentemente mais forte e prejudicial do que a primeira (CROWL, 2003).

Mais etapas podem ser geradas conforme houver combustível e ignição disponíveis. Assim, a segunda etapa é gerada a partir da primeira, que muitas vezes pode se tratar de uma explosão leve, mas que tem o potencial de provocar mais explosões secundárias e até detonações. A gravidade das explosões depende diretamente da pressão gerada, que é a maior responsável pelos danos no acidente.

Britton et al (2005) esclarecem que no momento em que a atmosfera formada por um material combustível e ar é inflamada, pode ocorrer uma rápida combustão. Se porventura isto ocorrer em um espaço confinado, a temperatura cresce rapidamente e, como consequência, a pressão ambiente também, podendo acarretar em uma explosão destrutiva.

Sichel, Kauffman e Li (1995) e Theimer (1972) explicam que a explosão primária, relativamente leve, é responsável por agitar as camadas depositadas de poeira. Ao propagar a chama, que serve de ignição para a suspensão de poeira recém formada, desencadeia-se uma explosão secundária. Esta normalmente apresenta maior gravidade do que a explosão primária, sendo capaz de dispersar mais poeira e varrer toda a planta com explosões. Havendo confinamento, os produtos da combustão em alta temperatura que estão atrás da frente da chama provocam uma aceleração da mesma, o que resulta na formação de um precursor de onda de choque à frente da chama (SICHEL, KAUFFMAN, LI, 1995 e THEIMER, 1972, p.140).

A explosão secundária também é chamada de deflagração. Crowl (2003, p. 15) explica a deflagração como “um processo de combustão onde a frente de reação se movimenta a uma velocidade menor do que a velocidade do som em gases que não reagiram”. É por meio de condução, convecção e radicais livres que a deflagração se propaga.

Segundo Crowl (2003), o fluxo de produtos de combustão suspende poeira, que estava previamente depositada, fornecendo mais combustível para acelerar a chama. Esse processo pode resultar na geração de pressões e velocidades de gás muito altas e destrutivas, sendo capaz de gerar pressões da ordem de 20 atm. Em seus estudos, Sichel, Kauffman e Li (1995) observaram que durante a transição de deflagração para detonação eram alcançados picos de pressão com amplitudes de até 60 atm.

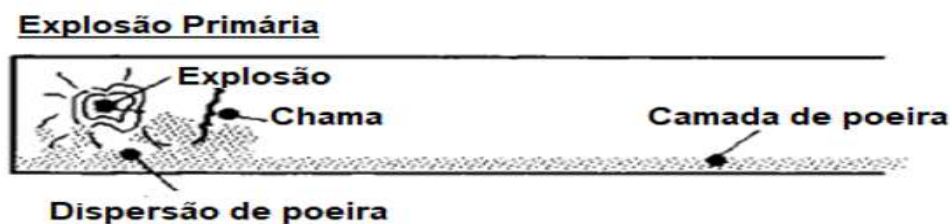
Segundo Eckhoff (1997), a detonação é um modo extremo de propagação de uma chama, onde em vez da transferência de calor ser feita através das moléculas ou de uma difusão turbulenta - característica da deflagração – ela ocorre por meio de uma ignição direta gerada pela compressão extrema da nuvem não queimada. Tal compressão ocorre devido a uma onda de choque conduzida através da nuvem em velocidade supersônica pela própria explosão.

Explica ainda que a detonação em uma nuvem de poeira só pode ser desencadeada através de uma onda de choque forte o bastante, podendo ter origem em uma carga explosiva, em meios externos, ou no acúmulo gradual de

um forte choque por aceleração turbulenta da própria explosão, que é a transição de deflagração para detonação (ECKHOFF, 1997, p.375).

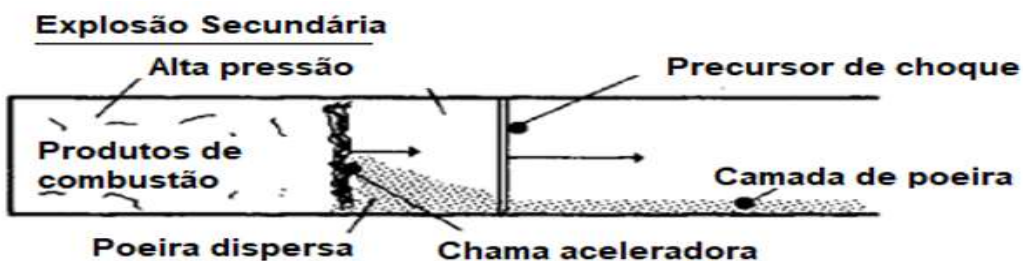
Crowl (2003, p. 46) esclarece ainda que “estágios adicionais de explosão podem ocorrer quanto mais poeira for perturbada”, indicando um encadeamento de explosões sucessivas que depende da disponibilidade de combustível (nuvens de poeira). Como observa-se na cronologia da explosão de poeira na figura 10a, quando a explosão primária ocorre, existe ainda muita poeira depositada, que entra em suspensão com aumento de pressão e movimentação de massas de ar. A chama propagada por esta primeira explosão gera então uma explosão secundária, a qual pode ser denominada deflagração, mostrada na figura 10b. Esta provoca a aceleração da chama e surge um precursor da onda de choque. Por último, a detonação surge da deflagração, a qual apresenta velocidade supersônica da chama, causando picos elevados de pressão e uma forte onda de choque, ilustrado na figura 10c.

Figura 10a. Mecanismo da explosão primária de poeira



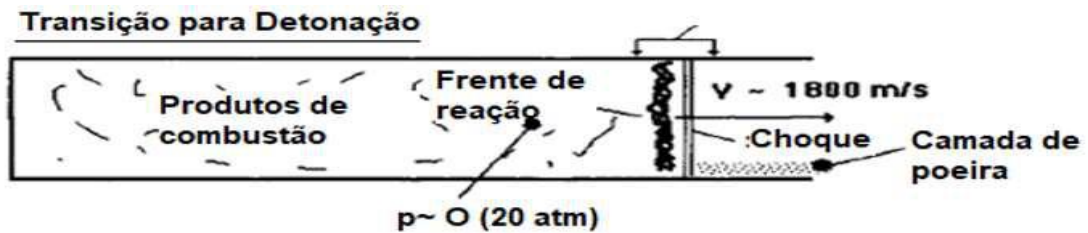
Fonte: Adaptado de Sichel, Kauffman e Li, 1995, p. 258

Figura 10b. Mecanismo da explosão secundária de poeira



Fonte: Adaptado de Sichel, Kauffman e Li, 1995, p. 258

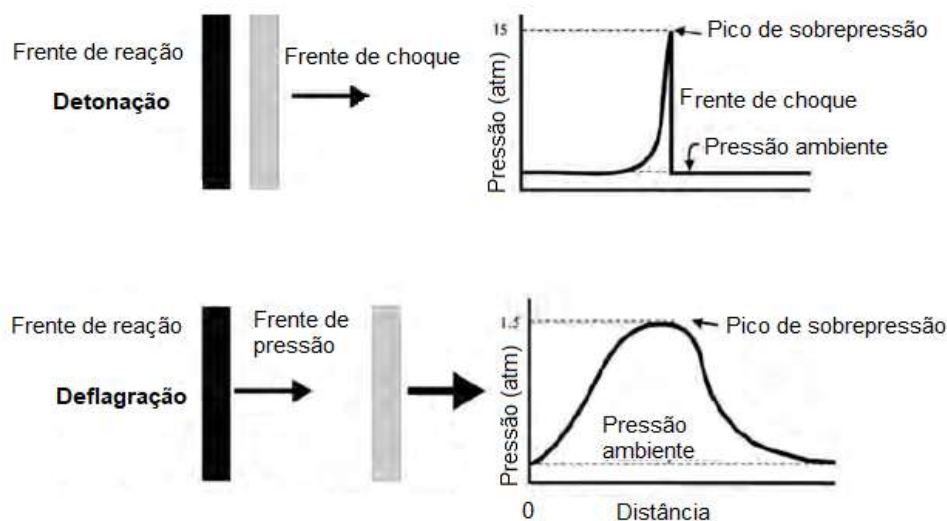
Figura 10c. Mecanismo da transição para detonação



Fonte: Adaptado de Sichel, Kauffman e Li, 1995, p. 258

Analisando a figura 11, percebe-se que a máxima pressão na detonação tem valor muito mais alto do que na deflagração, o que mostra mais uma vez a maior violência da detonação. Além disso, pode-se notar que a pressão na deflagração apresenta um perfil mais suave, podendo ser comparada a uma parábola, enquanto na detonação ela é um único pico.

Figura 11. Processos de detonação e deflagração



Fonte: Adaptado de Crowl, 2003, p. 59

2.4 Características

Segundo Smith, Van Ness e Abbott (2013), a variação de energia interna do sistema pode ser definida pela soma do calor Q e do trabalho W produzidos. Convencionalmente, as duas grandezas são positivas para transferências da

vizinhança para dentro do sistema. Por definição, “trabalho é realizado sempre que uma força atua ao longo de uma distância”, sendo representado pela seguinte equação:

$$dW = F * dL \quad [2]$$

Onde F é a força atuante, L é a distância ao longo da qual a força atua, P é a pressão resultante, A é a área de atuação direta da força. Temos que:

$$\frac{F}{A} = P \quad [3]$$

$$dW = -P * A d\frac{V}{A} \quad [4]$$

$$dW = -P * dV \quad [5]$$

$$dW = \int_{V_1}^{V_2} P * dV \quad [6]$$

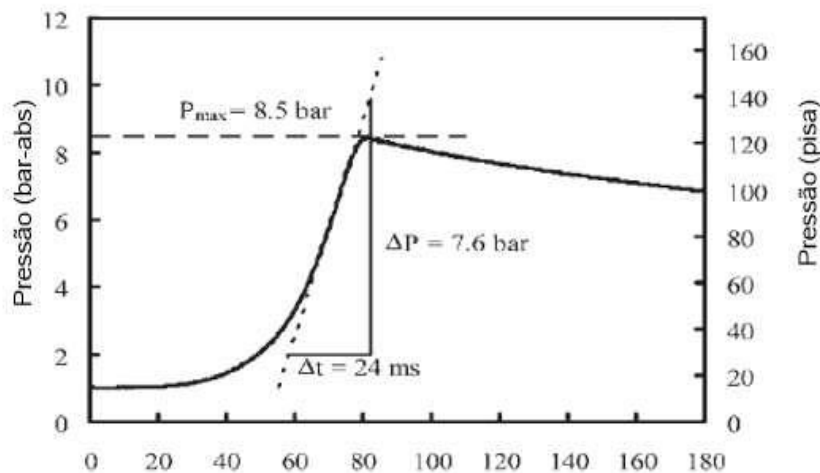
$$W = P * \Delta V \quad [7]$$

Onde, e ΔV é a variação de volume provocada entre o estado inicial V_1 e final V_2 .

Como já foi explicado anteriormente, explosões geram deslocamento por pressão, o que, por consequência, gera trabalho. Outra conclusão importante é que há variação de volume, o que é facilmente percebido ao se identificar a formação das esferas de chamas que aumentam durante uma explosão.

Existem dois parâmetros de pressão que são normalmente usados para caracterizar o comportamento deflagrativo de explosões, que são: pressão máxima durante uma combustão, P_{max} , e a taxa de variação de pressão em função do tempo, dP/dT . Observando a figura 12, verifica-se que a pressão cresce rapidamente para o valor máximo e depois decresce levemente, refletindo o resfriamento dos produtos gasosos pela superfície do reservatório.

Figura 12. Pressão máxima e a variação máxima de pressão usando uma esfera de 20 litros

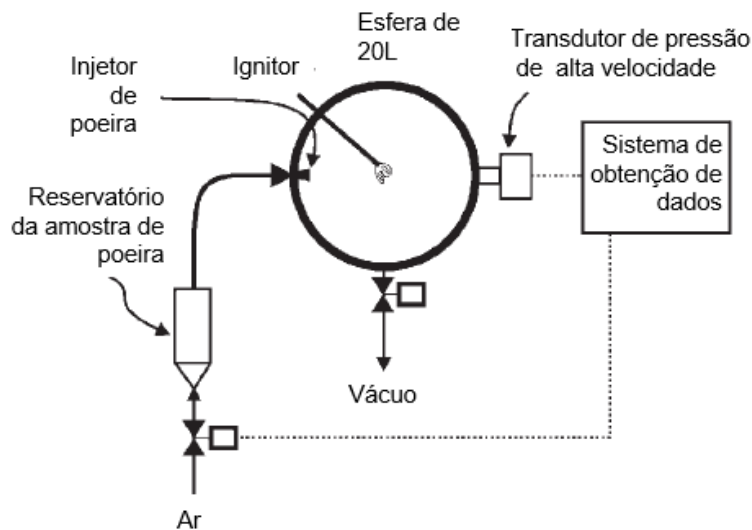


Fonte: Adaptado de Mashuga e Crowl, 1998 apud Crowl, 2003, p. 15

Da mesma forma, Richter (2012) define que “a pressão máxima da explosão, P_{max} , e a taxa de aumento da pressão, dP/dT , descrevem a violência da combustão da mistura ar/poeira em um reservatório fechado”.

O dispositivo normalmente utilizado para caracterizar o comportamento da combustão de gases, vapores e poeiras é a esfera de 20 litros, ilustrada na figura 13. O reservatório primeiramente é evacuado e em seguida recebe a injeção da amostra que será estudada. O reservatório é equipado com transdutor de pressão de alta velocidade para rastrear a pressão durante o processo de combustão. A ignição tem origem no centro do reservatório, podendo ser promovida “por uma faísca, queima de um fusível, um fio quente ou um dispositivo de ignição químico” (CROWL, 2003, p. 14). Os fusíveis são compostos por um fio metálico, geralmente chumbo, que apresenta um certo limite de amperagem, isto é, da intensidade de corrente que passa por ele. Quando esse limite é ultrapassado o fio superaquece, atingindo seu ponto de fusão, se derretendo e se rompendo. Ao se superaquecer, acaba liberando calor para o reservatório, aumentando a entropia térmica do material particulado em suspensão, o que inflama o sistema, causando a explosão (MUNDO EDUCAÇÃO, 2020).

Figura 13. Dispositivo usado para coletar dados sobre explosões com poeira



Fonte: Crowl, 2003, p. 45

No dispositivo podemos observar a variação da entropia de posição e da entropia térmica, devido à fonte de ignição provida. Além disso, temos uma reação de combustão ocorrendo que, segundo Smith, Van Ness e Abbott (2013), é “a reação entre um elemento ou composto e o oxigênio para formar produtos de combustão específicos. Para compostos orgânicos, formados por somente carbono, hidrogênio e oxigênio, os produtos são dióxido de carbono e água, porém o estado da água pode ser tanto o vapor quanto o líquido” (SMITH, VAN NESS, ABBOTT, 2013).

Há ainda um terceiro conceito derivado da pressão, que se chama índice de deflagração. Crowl (2003) define tal parâmetro igualmente para poeiras e para vapores. Para poeiras, o índice de deflagração é denotado por K_{st} , (st é abreviação de *Staub*, que significa poeira em alemão). Quanto maior o valor de K_{st} , mais violenta torna-se a explosão.

Crowl (2003) explica que à medida que se reduz o tamanho das partículas de poeira ou o conteúdo da mistura, o índice de deflagração (K_{st}) e a pressão máxima (P_{max}) crescem, e concomitantemente a concentração mínima explosiva (MEC) e a mínima energia de ignição (MIE) decrescem. Para Richter

(2012), Kst é uma medida normalizada do aumento da severidade da explosão de St-1 a St-3. Abaixo segue a equação matemática do índice de deflagração e, na tabela 2, faixas de valores de Kst com exemplos de materiais e a classe:

$$K_{St} = \left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max} V^{1/3} \quad [8]$$

Fonte: Crowl, 2003, p. 46

Tabela 2. Classificação St de poeiras segundo seu índice de deflagração

Índice de Deflagração Kst (bar-m/s)	Classe St	Exemplos
0	St - 0	Poeira de rochas
1 - 200	St - 1	Poeira de grãos de trigo
200 - 300	St - 2	Corantes orgânicos
> 300	St - 3	Aspirina, alumínio em pó

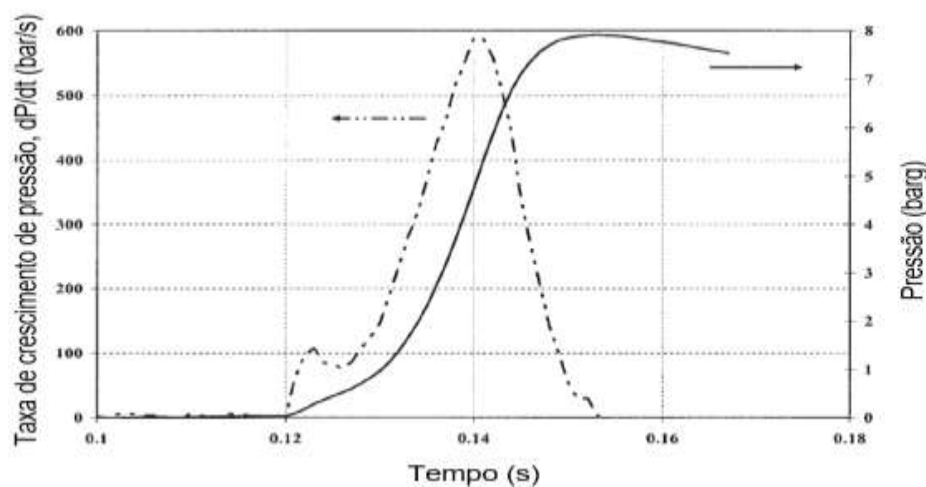
Fonte: Adaptado de Crowl, 2003, p. 46

Através da equação, pode-se notar que quanto maior a taxa de variação máxima de pressão, maior o valor do índice de deflagração, indicando maior severidade da explosão. Tal relação é simples de se assimilar, uma vez que quanto maior a pressão, maior força terá a explosão, sendo capaz de destruir estruturas mais resistentes e causando maiores danos.

O valor de classificação St (severidade da explosão) aumenta proporcionalmente com o índice de deflagração, que define aumento de violência da explosão. Então, quanto maior a classe St, maior a gravidade. Para avaliar os parâmetros abordados, Pmax, Dp/dt e Kst, utiliza-se o método E1226 da American Society for Testing and Materials (ASTM), que utiliza o dispositivo apresentado na figura 13.

Com intuito de coletar o máximo de dados, os testes são realizados aplicando-se uma ampla gama de concentrações de poeira e para cada concentração é plotado um gráfico, como o da figura 14. Para obter os valores máximos de pressão e taxa de variação de pressão deve-se considerar a maior concentração de poeira, simulando um ambiente de alto risco explosivo. Um exemplo da curva resultante é a figura 15, obtida por meio de um teste usando 500 g/m^3 (BRITTON et al, 2005).

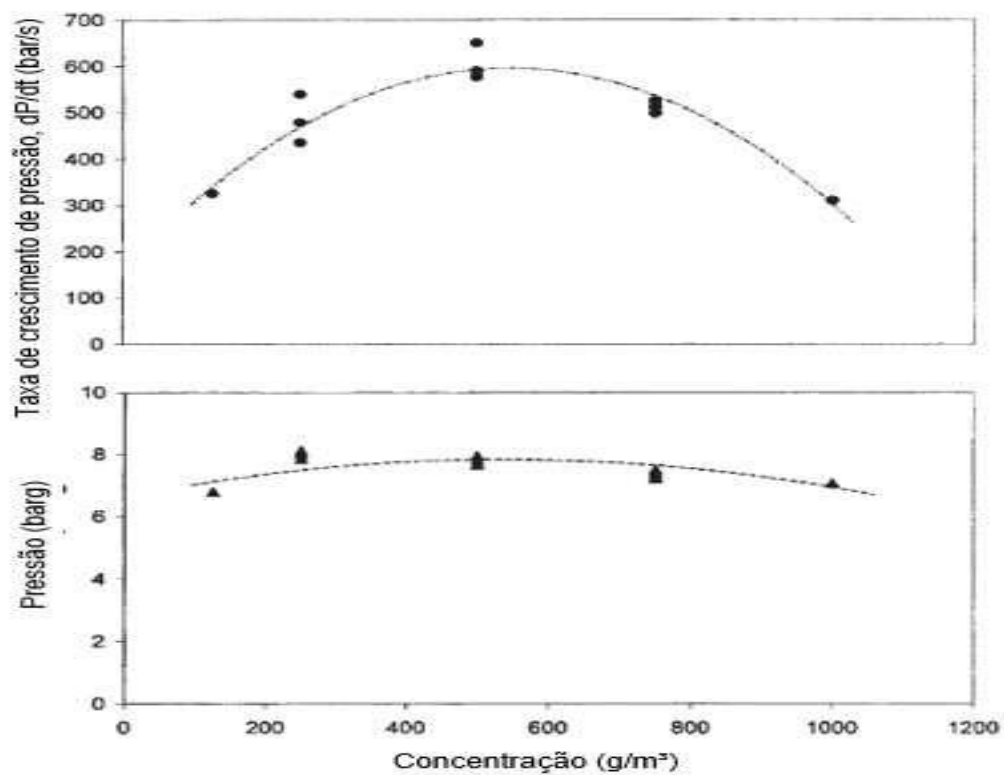
Figura 14. Curva típica de dados oriundos da E 1226 para pressão e aumento de taxa de pressão para explosões com pó



Fonte: Adaptado de Britton et al, 2005, p. 26

Um outro parâmetro importante é a distância de transição da deflagração à detonação, a qual foi estudada por Sichel, Kauffman e Li (1995). Comumente ela é utilizada como um indicador da probabilidade dessa transição ocorrer. Isto porque, em tubos ou canais mais curtos do que essa distância, a transição é improvável, sendo assim também a ocorrência de detonação.

Figura 15. Curva típica de aumento de pressão e taxa de pressão versus concentração oriundos da E1226



Fonte: Adaptado de Britton et al, 2005, p. 26

Capítulo 3. Fatores de risco para explosões

Os materiais particulados possuem propriedades que influenciam na facilidade com a qual uma explosão ocorre. Dentre elas estão tamanho da partícula e conteúdo da mistura, por exemplo. Tais propriedades adicionais tornam a caracterização deste material uma tarefa muito difícil, sendo então altamente recomendável realizar uma identificação experimental, usando condições o mais próximas possível das condições do processo real (CROWL, 2003).

3.1 Concentração

A concentração da poeira influencia na possibilidade de haver uma explosão. A concentração mínima explosiva (MEC, do inglês *minimum explosible concentration*) é a mínima quantidade de poeira que precisa estar em suspensão para possibilitar condições explosivas (RICHTER, 2012).

Segundo Britton e Harrinson (2018), a mínima concentração explosiva é equivalente ao limite inferior de inflamabilidade (LFL) de gases e vapores, expresso em massa de combustível por unidade de volume de ar.

Nuvens de poeira de baixa concentração apresentam maior distância entre as partículas, o que justifica a menor probabilidade de ocorrência de explosões nesses cenários. Assim, o calor é consumido pelo ar que envolve as partículas antes de conseguir alcançar uma próxima partícula. Em contrapartida, quando as partículas estão próximas entre si, o que ocorre é uma reação de combustão em cadeia, que tem como consequência uma explosão de poeira (THEIMER, 1972).

A MEC é usada para caracterizar o nível de segurança de condições operacionais em processos ou instalações industriais. Mantendo-se as condições de processo bem abaixo da MEC, o risco de acidentes pode ser considerado mínimo. Na prática, a MEC pode ter a função de indicar a probabilidade de explosões resultantes de acúmulos ou escapes de poeira, que, caso se dispersem no ambiente, podem gerar um cenário de alto risco para explosões (BRITTON et al, 2005).

Para determinar a mínima concentração explosiva de poeiras combustíveis, a ASTM E1515 desenvolveu um método de teste padrão. Ele consiste na dispersão de poeira em um reservatório de 20 L e a partida de um ignitor pirotécnico (BRITTON et al, 2005).

Grande parte das explosões de poeira mais graves ocorrem em instalações industriais envolvendo a liberação de poeira de equipamentos ou a dispersão de uma camada depositada. Isso acontece, porque, apesar da liberação de poeira ocorrer em um equipamento cuja concentração estava abaixo da mínima concentração explosiva, este material pode se depositar em outras superfícies, aumentando sua concentração no ambiente externo, podendo alcançar valores acima da MEC. Esse acúmulo pode ser disperso no ar, criando uma atmosfera explosiva (MYERS, IBARRETA 2013). A concentração mínima explosiva de alguns pós comuns da indústria de alimentos é apresentada no anexo A deste trabalho.

A redução de tamanho das partículas de poeira tende a diminuir energia mínima de ignição (MIE), que é a menor quantidade de energia que precisa ser recebida para que a explosão ocorra. A redução do tamanho de partícula diminui também a concentração mínima explosiva, mostrando que materiais com partículas menores possuem maior facilidade de inflamar (MYERS, IBARRETA, 2013).

3.2 Tamanho da Partícula

A principal diferença entre sólidos e poeiras combustíveis é que estas últimas se apresentam em pequeno tamanho de partícula, fazendo com que tenham grande área superficial, bem maior do que a de sólidos. Normalmente, a taxa de combustão deles é limitada pela sua restrita área superficial em contato com o material oxidante (geralmente o ar), o que não ocorre com as poeiras, já que conforme o tamanho de partícula de poeira diminui, a área superficial aumenta e, com isso, a taxa de combustão por massa de material aumenta (MYERS, IBARRETA, 2013).

Ao se reduzir o tamanho das partículas, aumenta-se sua área superficial e, conseqüentemente, amplia-se o contato das partículas com o oxigênio do ar, o que eleva a probabilidade de ignição (THEIMER, 19972). Uma boa analogia proposta por Myers e Ibarreta (2013), ilustrada na figura 16, é a comparação da facilidade de combustão entre um tronco de madeira, estacas de madeira e pó de madeira, mostrando que respectivamente essa facilidade aumenta.

Figura 16. Comparação entre combustão de madeira em diversos tamanhos



Fonte: Adaptado de Myers e Ibarreta, 2013, p.300

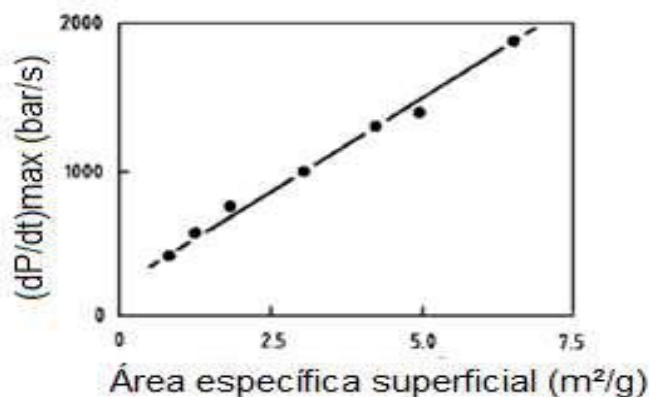
Explosões de poeira por vezes se assemelham às explosões de gás, e conforme o tamanho das partículas é reduzido, essa semelhança aumenta. Isto faz todo sentido quando se percebe que em um meio gasoso as moléculas do gás combustível estão completamente circundadas pelo gás comburente e vice-versa. Em uma suspensão, conforme se reduz o tamanho da partícula, mais o sistema se aproxima do cenário de uma mistura gasosa. Quanto menor o tamanho das partículas do pó combustível, maior contato ele tem com o ar e mais chances ele tem de permanecer em suspensão por mais tempo. Além disso, menor é a energia requerida para provocar uma explosão, e mais violenta ela será (THEIMER, 1972).

A dependência do tamanho das partículas apresenta variação para materiais distintos, ou seja, não há um único tamanho de partícula que determine se o material é ou não explosivo (MYERS, IBARRETA, 2013). Como será abordado ao longo deste capítulo, muitos fatores influenciam na explosividade de um sistema, assim como em uma função de inúmeras variáveis dependentes. Ao

buscar o tamanho de partícula explosivo, são fixadas determinadas condições no sistema, onde se varia apenas a variável de estudo. Ou seja, a variável depende dessas condições pré-estabelecidas.

A taxa de combustão das nuvens de poeira aumenta sistematicamente com a área superficial específica do pó. Em estudos com poeira de alumínio, foi determinada graficamente a relação entre a variação de pressão com a área superficial do pó (ECKHOFF, 1997, p. 30). Tal relação pode ser entendida da seguinte forma: quanto maior a área superficial específica do pó, maior contato ele tem com o comburente, acelerando a reação de combustão. Intuitivamente, pós de pequeno tamanho têm maior área superficial, sugerindo que pós mais finos reagem mais rapidamente com o ambiente. Conforme mostra a figura 17, quanto maior a área específica superficial da poeira, maior a variação máxima de pressão, indicando que a pressão gerada pela explosão aumenta mais rapidamente. Nota-se também que essa relação pode ser aproximada por uma reta, apresentando relação linear.

Figura 17. Influência da área específica superficial de poeira de alumínio na máxima taxa de variação de pressão em um reservatório padrão de 1m³



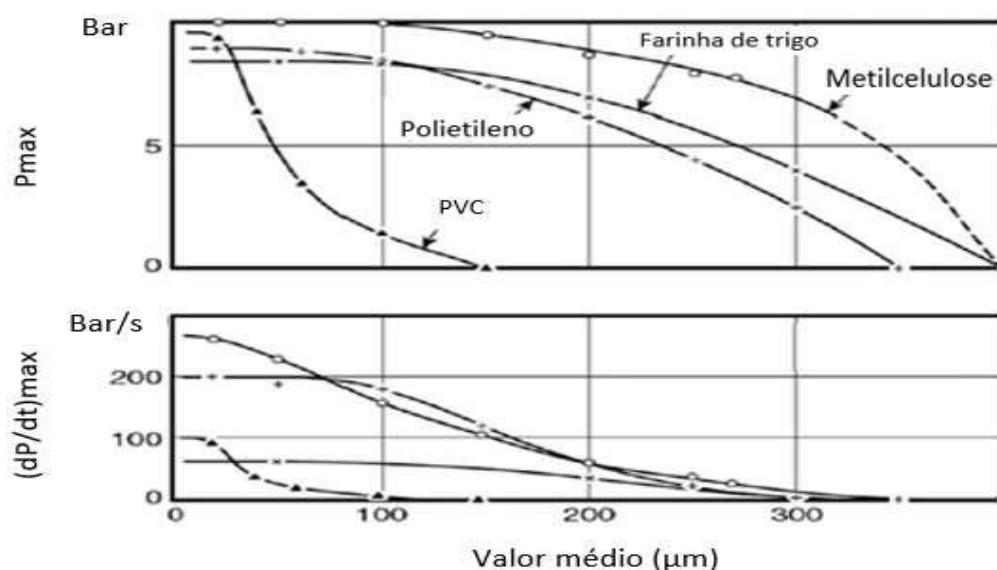
Fonte: Adaptado de Bartknecht, 1978, apud Eckhoff 1997, p. 30

Estudos realizados com quatro materiais diferentes mostraram que a pressão e sua taxa de variação máxima são influenciadas diretamente pelo tamanho médio das partículas, como ilustra a figura 18. É possível perceber que para os quatro materiais estudados o comportamento da curva é o mesmo, indicando

que a pressão máxima (P_{max}) e a taxa máxima de aumento de pressão (dP / dt) max são alcançadas em valores de menor tamanho médio de partícula do material (MYERS, IBARRETA, 2013).

Como pode-se perceber na figura 18, com o aumento do tamanho da partícula (eixo x) os valores de pressão máxima e variação de pressão diminuem. Observa-se também que, embora essa relação seja comum para muitos materiais, alguns apresentam um comportamento mais dependente do que outros, como é o caso do PVC, cuja queda é mais rápida do que a dos outros três materiais estudados.

Figura 18. Dependência entre tamanho de partícula e pressão máxima (figura superior) e variação de pressão máxima (figura inferior)

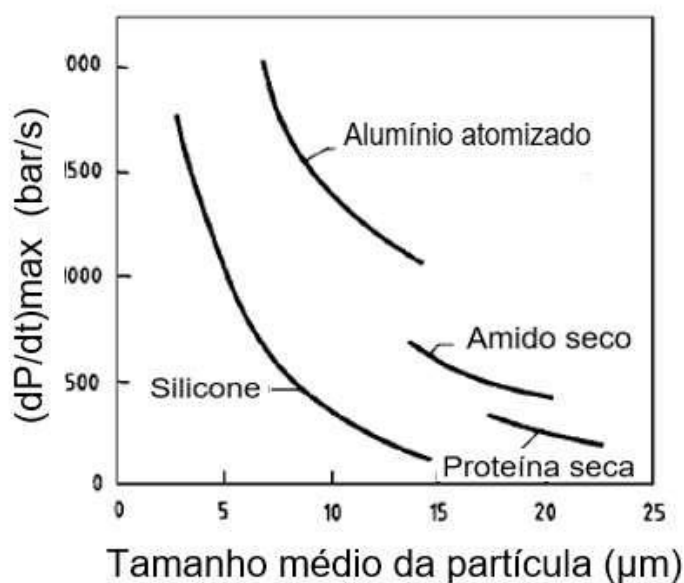


Fonte: Adaptado de NFPA 68, 2007 baseado nos dados de Bartknecht, 1981, apud Myers e Ibarreta, 2013

Acima de determinado tamanho de partícula específico, os materiais deixam de ser explosivos e a pressão máxima atingida (P_{max}) e a taxa de aumento de pressão máxima (dP / dt) max são nulas. Conforme o tamanho das partículas diminui, a pressão máxima P_{max} aumenta, apontando que a combustão foi mais completa. Além disso, a taxa de variação de pressão máxima (dP / dt) max aumenta, indicando uma taxa de combustão maior (MYERS, IBARRETA, 2013).

A figura 19 ilustra essa relação, mostrando o comportamento de quatro materiais, de composições bastante diferentes entre si. Através da figura, é possível compreender que cada material possui determinado tamanho médio de partícula que torna nula a variação de pressão. Por exemplo, partículas de silicone com tamanhos acima de 15 micrômetros aproximadamente apresentam variação de pressão bem baixa, sugerindo que a sua chance de provocar explosões também é baixa.

Figura 19. Variação de pressão usando variados tamanhos de partícula, com 4 diferentes materiais.



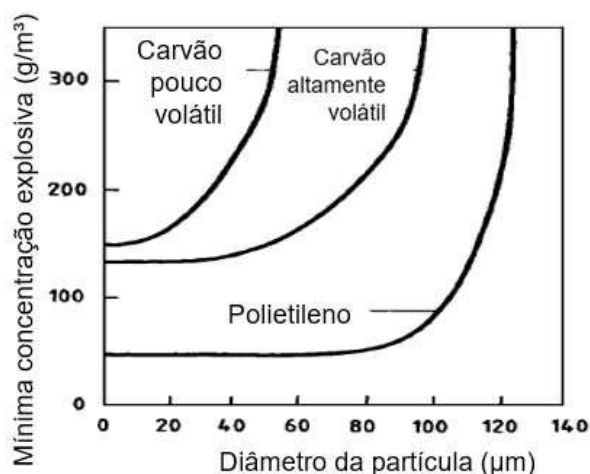
Fonte: Adaptado de Eckhoff et al, 1986 apud Eckhoff 1997, p. 31

Myers e Ibarreta (2013) explicam que existem na literatura inúmeras tabelas com parâmetros explosivos de poeira de alguns materiais, como concentração mínima explosiva e energia mínima de ignição. É altamente recomendável, no entanto, executar testes individuais para a poeira específica que será aplicada em casos práticos, como em indústrias. O motivo é que muitos dos testes publicados foram feitos utilizando métodos antigos, os quais podem subestimar o risco de certos materiais. A recomendação é, portanto, realizar testes utilizando condições o mais próximas possível das condições reais de aplicação, para que

se tenham resultados mais confiáveis. Tais condições incluem principalmente: tamanho de partícula, concentração e composição da poeira.

Considerando que todas as partículas em uma nuvem de poeira sejam pequenas o suficiente para vaporizar por completo na zona de pré-aquecimento da chama, a mínima concentração explosiva da poeira, aproxima-se da MEC do vapor. Os valores de concentração mínima explosiva estimados para vapores devem ser aproximados por neblina ou nuvens de poeira, conforme as partículas se tornem menores e mais uniformemente dispersas (BRITTON, HARRINSON, 2018). A figura 20 ilustra essa relação, mostrando o comportamento da mínima concentração explosiva de três materiais diferentes para variados diâmetros de partícula. Pode-se notar que, dentre os materiais estudados, o carvão pouco volátil apresenta uma forte dependência entre o tamanho da poeira e a mínima concentração explosiva. Ao mesmo tempo, ao analisar o polietileno, percebe-se que ele mantém um valor da MEC constante para uma maior faixa de diâmetro de partícula. Porém, para diâmetros próximos a 100 micrômetros, a dependência passa a ser muito forte, o que é interpretado pelo rápido crescimento da curva.

Figura 20. Dependência entre mínima concentração explosiva e diâmetro da partícula



Fonte: Adaptado de Hertzberg and Cashdollar, 1987 apud Eckhoff 1997, p. 32

3.3 Ignição

Como já citado anteriormente, para que ocorra uma explosão é necessário que haja uma fonte de ignição. A energia mínima de ignição (MIE) é definida como a mínima entrada de energia necessária para iniciar uma explosão de poeira (RICHTER, 2012).

É possível determinar a energia mínima de ignição de um determinado combustível a partir do teste padrão ASTM E2019, que por meio de um capacitor, provoca uma faísca que incendeia a mistura nuvem de poeira-oxidante (BRITTON et al, 2005).

Myers e Ibarreta (2013, p. 304) definiram nove fontes potenciais de ignição de nuvens de poeira, são elas:

- Faíscas (fricção, elétrica, eletricidade estática)
- Aterramento, ligação inadequados
- Superfícies quentes
- Trabalhos a quente
- Chamas abertas
- Sistemas de aquecimento
- Correias deslizantes
- Rolamentos
- Equipamentos elétricos

As faíscas podem ser geradas por meio de fricção (atrimento), corrente elétrica e eletricidade estática presentes na área de processo.

Movimentações de grandes volumes de líquidos, gases e poeiras dentro de tubulações e equipamentos do processo e do transporte pneumático na indústria resultam em uma grande quantidade de eletricidade estática. Por sua vez, essa eletricidade estática consegue criar diferenças de potenciais eletrostáticos que podem provocar centelhas, tornando-se possivelmente uma fonte de ignição de atmosferas explosivas que estejam presentes em áreas classificadas contendo matéria

combustível (BULGARELLI, 2019, documento eletrônico sem paginação).

Proust (2005), dividiu as fontes de ignição em dois subgrupos: ignição por faísca e ignição por superfície quente.

Fisicamente, parece que algumas das fontes "práticas" induzem ignição quase imediatamente (centenas de microssegundos, como faíscas de impacto, descargas eletrostáticas) enquanto em outras fontes a chama aparece depois de um período de tempo muito maior (milissegundos a minutos, como em áreas quentes, zonas de atrito). A primeira categoria de fontes será chamada 'ignição por faísca' e a segunda 'ignição por superfície quente' (PROUST, 2005, p. 113).

Segundo Richter (2012), a temperatura mínima de autoignição indica a sensibilidade apresentada por uma nuvem de poeira de se autoignificar quando exposta a temperaturas elevadas. A energia mínima de ignição e a temperatura mínima de autoignição de alguns pós comuns da indústria de alimentos são apresentadas no anexo A deste trabalho.

Dessa forma, faz sentido o fato de que a mínima energia de ignição geralmente decresce com o aumento da temperatura inicial da mistura (CROWL, 2003, p. 46). Quanto mais quente a mistura, mais calor presente nela, o que aumenta as chances de que ela mesma seja capaz de provocar a ignição de uma explosão.

3.4 Umidade

Umidade é mais um fator importante a ser considerado. Nos Estados Unidos, entre 1979 e 1986, estatísticas mostram que a grande maioria dos acidentes envolvendo explosões com poeira ocorreram nos meses de inverno (novembro a fevereiro nos estados de baixa latitude, e outubro a março para estados de altas latitudes), bem como em áreas continentais (160 quilômetros ou mais distantes ainda da costa). Nas duas condições citadas, há baixa umidade, o que contribui para as causas de explosões com pós na indústria de grãos. Isso ocorre

porque a umidade do ar do ambiente afeta diretamente o conteúdo de umidade da poeira (SICHEL, KAUFFMAN e LI, 1995).

Seguindo a mesma linha de raciocínio, Theimer (1972) definiu que poeira seca tende a aumentar a inflamabilidade das partículas e, conseqüentemente, a probabilidade de formação de nuvens explosivas. Segundo Eckhoff (1997, p. 28), “a presença de umidade na poeira reduz sua sensibilidade à ignição e a violência da explosão”. Ele alerta ainda que caso as medidas de prevenção a ignição elétrica sejam baseadas em dados de MIE, é imprescindível que a umidade real não seja menor do que aquela utilizada para obter os dados de MIE.

Durante seu estudo, Sichel, Kauffman e Li (1995) fizeram testes com poeira Mira Gel em condições de baixa e de alta umidade. Eles observaram que a maior parte dos testes que resultaram em uma transição deflagração-detonação (DDT) foram realizados durante o inverno, quando as condições eram mais secas, fazendo com que as camadas de poeira estivessem em contato direto com o ar do ambiente. Ou seja, nas condições de menor umidade houve maior desenvolvimento e duração das explosões geradas, chegando ao ponto de detonação. Isto mostra que poeira seca resultou em explosões mais severas, com maior potencial destrutivo.

Os pesquisadores registraram também os históricos de pressão e as trajetórias da chama para as duas condições de testes. Como resultado, constataram que a velocidade da chama no teste da poeira seca continuou aumentando ao longo do teste, enquanto que, para o teste com poeira úmida, a velocidade da chama desacelerou e, como consequência, gerou uma pressão muito mais baixa do que no teste seco (SICHEL, KAUFFMAN e LI, 1995).

3.5 Composição da mistura: material e oxidante

Materiais que sofrem oxidação liberando calor (tanto orgânicos, como inorgânicos) podem, em geral, ser considerados combustíveis se apresentarem um tamanho de partícula suficientemente pequeno. Contudo, aqueles que já estão na sua forma oxidada ou que não podem ser oxidados exotermicamente,

são pós não combustíveis, o que faz todo sentido, já que é sabido que reações de combustão são reações de oxidação. Portanto, quando o material particulado não é capaz de sofrer oxidação, também não pode servir de combustível para uma combustão. Alguns exemplos são calcário (CaCO_3), ferrugem (Fe_2O_3), areia (SiO_2) e sal de mesa (NaCl) (MYERS, IBARRETA, 2013).

Já os pós combustíveis são aqueles que podem sofrer combustão, e a facilidade com a qual essa reação ocorre depende da composição da poeira. Observando a figura 21, nota-se que os pós estudados revelam curvas distintas de mínima energia de ignição para a mesma porcentagem de conteúdo, sugerindo que diferentes materiais apresentam fatores de risco distintos, explicado pela variação de composição da mistura, composta pelo pó e pelo oxidante.

Figura 21. Influência do conteúdo de mistura de poeira na mínima energia de ignição via faísca elétrica para 3 tipos de pós



Fonte: Adaptado de Van Laar e Zeeuwen, 1985 apud Eckhoff 1997, p. 28

Como apresentado no item 3.1, a concentração do pó combustível influencia diretamente na ocorrência da explosão. A mistura, no entanto, não é formada apenas de poeira, mas também do meio gasoso comburente, o qual é responsável por oxidar o material sólido. De acordo com Myers e Ibarreta (2013), alguns gases, como dióxido de carbono e flúor são capazes de fazer o papel de comburente em cenários envolvendo poeira de certos metais explosivos. Apesar

disso, o oxigênio do ar é o oxidante mais comum em explosões com poeiras na vida prática.

Não apenas a concentração do combustível influencia, mas também a concentração do comburente, o que faz todo sentido. Para uma explosão ocorrer, ambos os fatores devem estar em proporções favoráveis. Para determinar a concentração mínima de oxigênio (LOC, do inglês *Lowest Oxygen Concentration*) para nuvens de poeira, foi desenvolvido o método ASTM WK1680. O método é capaz de identificar condições operacionais para poeiras em situações onde encontra-se a concentração de oxigênio. Resumidamente, o teste consiste na dispersão de poeira dentro de uma câmara que comporta uma mistura gasosa com uma baixa concentração de oxigênio. Para determinar o LOC, a concentração de oxigênio é reduzida gradativamente até o momento em que a nuvem de poeira não ignifique mais (BRITTON et al, 2005).

Capítulo 4. Métodos de redução de danos

Neste capítulo serão abordados métodos voltados para a minimização de riscos e consequências geradas por possíveis explosões. Eles se subdividem em métodos preventivos e métodos corretivos.

Segundo Crawl (2003, p. 113), um programa de segurança deve apresentar quatro vertentes:

1. Identificação e caracterização dos principais perigos do processo.
2. Aplicação de conceitos de design inerentemente mais seguros para eliminar ou minimizar os perigos.
3. Controle dos perigos para prevenir um acidente.
4. Mitigação dos impactos de um acidente, caso ocorra.

4.1 Métodos preventivos

Os métodos preventivos consistem em práticas que buscam retirar do sistema ao menos um dos componentes do pentágono de explosão, evitando, assim, a ocorrência de acidentes.

4.1.1 Projeto da planta

Especificamente sobre o item “Aplicação de conceitos de design inerentemente mais seguros para eliminar ou minimizar os perigos”, Crawl (2003) definiu quatro estratégias para se obter um design mais seguro da planta: minimizar, substituir, moderar e simplificar. Tais estratégias consistem respectivamente em: reduzir a quantidade de material ou energia envolvida no processo, incluindo insumos e dimensão de equipamentos; substituir materiais perigosos por alternativas de menor risco; moderar condições e parâmetros aos quais o processo será submetido; e simplificar o layout da planta, facilitando o controle.

4.1.2 Housekeeping - Práticas de limpeza

Como foi visto ao longo deste trabalho, poeira depositada pode queimar e, por isso, os esforços de controle de risco de explosão de poeira devem estar voltados para a prevenção da combustão primária (FRANK, 2004). Para isso, deve-se evitar concentrações explosivas de poeira e fontes de ignição.

Concentrações acima da MEC normalmente não estão presentes nas áreas de trabalho durante a operação normal, porém é provável que estejam presentes nos equipamentos de processo ou nas áreas de trabalho durante perturbações que causam liberação de poeira ou dispersão das acumulações de poeira (MYERS, IBARRETA, 2013, p. 299).

Já que é praticamente impossível eliminar totalmente estas variáveis em certos equipamentos industriais, como em elevadores de grãos e moinhos de farinha, o risco de uma explosão sempre existirá. Segundo Myers e Ibarreta (2013, p. 299), “o pó sempre se desenvolverá e fontes de ignição estão sempre presentes”, e por isso, é importante reduzir ao mínimo a quantidade de poeira dispersa e, para isso, é essencial manter uma boa higienização dos equipamentos e do ambiente, em geral. Toda e qualquer fuga de poeira dos equipamentos deve ser impedida (THEIMER, 1972).

De acordo com Myers e Ibarreta (2013), a prevenção deve ocorrer na prática, minimizando nuvens e acúmulos de poeira nas instalações. Segundo a NFPA 61 (2008), as instalações devem possuir superfícies horizontais minimizadas para evitar o acúmulo de poeira em áreas onde acúmulos significativos podem ocorrer (NFPA 61, 2008). Outro ponto importante é que diversas normas apresentam como requisitos a manutenção de pós no interior do equipamento de processo, o que pode ser conseguido através de vários métodos (MYERS, IBARRETA, 2013, p. 305):

- Projetar e manter o equipamento à prova de explosões de poeira
- Operação do equipamento sob pressão negativa
- Usar coletores de poeira em pontos de geração de poeira
- Realizar manutenção frequente para impedir que os acúmulos atinjam limites perigosos.

- Quanto melhor o design dos equipamentos e sistemas de coleta de poeira, menos tarefas de limpeza são necessárias.

É importante destacar que são necessários procedimentos e equipamentos específicos para transferência em segurança poeiras combustíveis (tanto para dentro como para fora de equipamento) (NFPA 654, 2000 apud CROWL, 2003).

Segundo Myers e Ibarreta (2013), o *housekeeping*, que é o conjunto de práticas de limpeza das instalações, deve ser realizado de maneira segura para evitar riscos durante a limpeza. Para isso, deve-se utilizar métodos que minimizem a formação de suspensões, realizando varreduras suavemente, por exemplo (MYERS, IBARRETA, 2013).

Segundo Frank (2004), os programas de limpeza da indústria devem abranger todos os locais em que o pó combustível pode se acumular, incluindo todas as superfícies, como por exemplo paredes, teto e tubulações. É importante limitar a suspensão de poeira durante a limpeza, sempre o fazendo após remover todas as possíveis fontes de ignição, isto é, evitar que a limpeza seja realizada enquanto a planta estiver em operação, ou enquanto os equipamentos ainda estiverem quentes ou energizados. É essencial que seja cumprida uma frequência de limpeza regular, que inclusive é um requisito da NFPA 654, tomando cuidado ao utilizar ar comprimido, para que este não suspenda a poeira (FRANK, 2004).

De acordo com a NFPA 61 (2008), o uso de ar comprimido provoca a suspensão de poeira no ar, o que deve ser permitido apenas em situações nas quais todas as máquinas da área tenham sido desligadas e todas as fontes de ignição tenham sido controladas.

4.1.3 Sistema de Ventilação por Exaustão

A ventilação tem por objetivo dificultar a formação de depósitos de pó no ambiente, promovendo remoção do material. Tal função é de extrema importância principalmente em locais de difícil acesso para limpeza manual, que apresentam grande potencial de incêndio e explosões (FERNANDES, NAMBA e GOZZI, 2011).

É um sistema baseado em dois pilares: diluição do contaminante para que atinja uma concentração abaixo de determinado limite e remoção do contaminante antes que este alcance os trabalhadores (CROWL e LOUVAR, 2002).

A localização onde serão instalados os equipamentos do sistema deve ser estudada analisando todas as máquinas envolvidas, o local de fixação dos dutos de aspiração e do equipamento de separação. É essencial que a tubulação do sistema seja corretamente dimensionada, de modo que não permita deposição de material nem produção de eletricidade estática, a qual pode constituir fonte de ignição. Além disso, os equipamentos do sistema de ventilação devem ser resistentes as condições operacionais que serão aplicadas no processo (FERNANDES, NAMBA e GOZZI, 2011).

Um bom captor é aquele que consegue aspirar o máximo de substâncias, com a menor vazão de ar, pois isto implica no tamanho do equipamento, potência absorvida e tamanho dos dutos de transporte, porém é importante que capture o máximo de substâncias indesejáveis (FERNANDES, NAMBA e GOZZI, 2011).

De acordo com a norma NFPA 61 (2008), os sistemas de ventilação ou exaustão utilizados em áreas de risco devem ser equipados com sistemas de filtração capazes de remover o material particulado do ar.

4.1.4 Purga e Inertização

Purga e inertização são técnicas de alteração da concentração do gás comburente dentro de processo, normalmente adicionando um gás inerte em uma mistura combustível. O objetivo é diminuir a concentração de oxigênio no compartimento, de modo que ela fique abaixo da concentração mínima. Alguns exemplos de gases inertes são nitrogênio, dióxido de carbono e até vapor. Para muitos pós a LOC é de aproximadamente 8% (CROWL, 2003; CROWL e LOUVAR, 2002).

A utilização de gases inertes exige extrema cautela, pois, se aspirado, pode asfixiar. Deve-se garantir que o gás inerte não escape para o ambiente de

trabalho, bem como assegurar o treinamento e comportamento seguro dos funcionários (CROWL, 2003).

Existem vários métodos de purga usados para reduzir inicialmente a concentração de oxigênio para seu mínimo: purga a vácuo, purga por pressão, purga combinada pressão a vácuo, purga de pressão com nitrogênio impuro, purga de varredura e purga de sifão (CROWL e LOUVAR, 2002).

4.2 Métodos corretivos

Os métodos corretivos consistem em tecnologias que buscam mitigar os efeitos de uma explosão. Eles são acionados quando se detecta o início de uma chama, minimizando a sua propagação e, com isso, suas consequências.

4.2.1 Ventilação de alívio

Trata-se de um método de controle de pressão, que consiste na instalação de um diafragma de ruptura no processo, ou seja, um respiradouro. Ele é projetado para permitir a descarga de chamas e pressão geradas durante uma possível explosão, por isso deve ser posicionado em um local previamente estudado e analisado (GOING, LOMBARDO, 2007; FIKE; FERNANDES, NAMBA e GOZZI, 2011). Segundo Crowl (2003), é uma técnica que pode ser usada para reduzir o valor de pressão máxima desenvolvida por determinada deflagração. No entanto, não é eficaz para aliviar pressões provenientes de detonações.

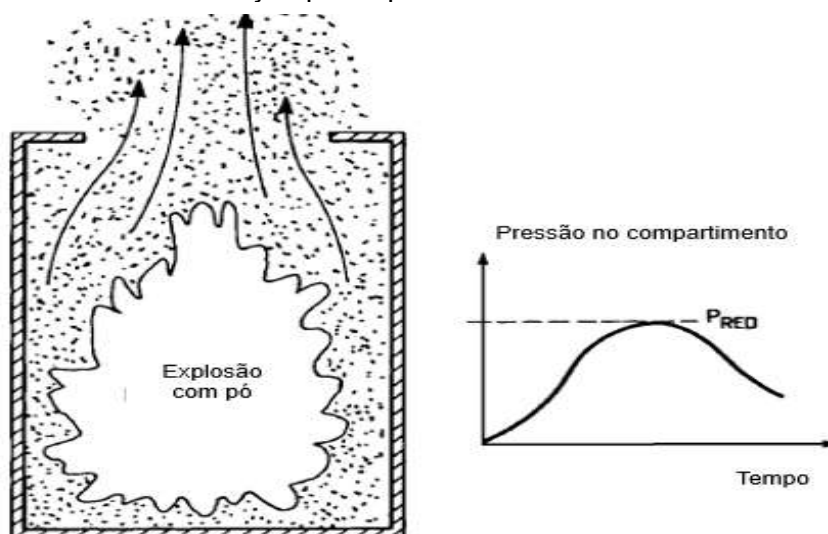
A pressão máxima alcançada numa explosão ventilada (P_{Pred}) é o resultado de dois processos competidores: a queima da nuvem de poeira, que desenvolve calor e aumenta a pressão, e por outro lado o fluxo de nuvem através do respiradouro, o qual alivia a pressão (ECKHOFF, 1997).

O sistema funciona da seguinte forma: quando uma fonte de ignição inflama uma nuvem de poeira suspensa em determinado compartimento do processo, forma-se uma bola de fogo que cresce rapidamente, provocando um aumento abrupto de pressão. A chama e a onda de pressão percorrem uma determinada trajetória até alcançarem o respiradouro, que deve abrir e permitir a liberação da bola de

fogo e da sobrepressão, aliviando o sistema e mantendo a integridade da instalação (FIKE).

O mecanismo é ilustrado na figura 22, que mostra a abertura do respiradouro dando passagem ao material e à chama gerados pela explosão. No gráfico é possível notar que a pressão no compartimento aumenta até atingir a P_{RED} , que é a pressão necessária para abrir o respiradouro. A partir do momento de sua abertura, a pressão decai, indicando que houve o alívio do sistema através da ventilação.

Figura 22. Mecanismo da ventilação por explosão



Fonte: Adaptado de Eckhoff (1997)

A área de ventilação deve ser calculada de modo que a pressão dentro do compartimento do processo mantenha-se abaixo da pressão na qual o compartimento seria destruído (GOING, LOMBARDO, 2007). Este valor depende diretamente: das propriedades do material, que no caso dos pós é seu índice de deflagração K_{st} ; da pressão que será gatilho para abertura do respiradouro; da relação comprimento/diâmetro do compartimento; do volume do compartimento e da densidade de área do painel de ventilação (CROWL, 2003).

A NFPA 61 (2008) ressalta que locais onde haja risco de explosões com pó devem ser equipados com sistema de ventilação por alívio distribuídos pelas

paredes e teto externos. O sistema deve ser direcionado para um local externo e seguro, longe de saídas ou áreas ocupadas (NFPA 61, 2008).

4.2.2 Supressão

Sistemas de supressão mitigam os efeitos perigosos de uma deflagração dentro de um compartimento fechado, porque são capazes de detectar os primeiros indícios do evento, extinguindo a bola de fogo antes que a pressão resultante ultrapasse a pressão de resistência do ambiente. Um sistema de supressão de explosões é composto de um painel de controle, detectores de explosão e supressores de alta taxa de descarga que tenham bicos dispersores (GOING, LOMBARDO, 2007).

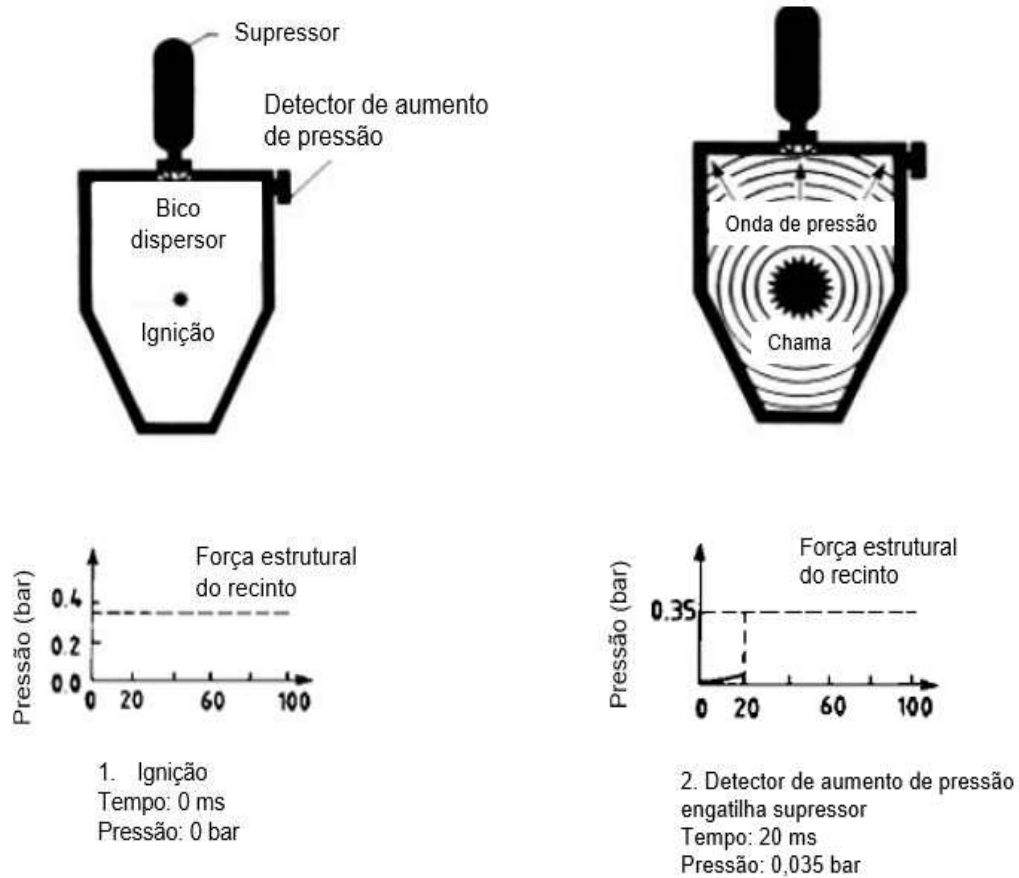
Consiste na injeção de um agente capaz de suprimir a chama propagadora da explosão, reduzindo a temperatura do combustível de modo que este não consiga sustentar a combustão. O mecanismo fundamental do sistema de supressão é a absorção de calor (GOING, LOMBARDO, 2007).

O sistema de supressão visa detectar a chama ou o aumento de pressão, e promover a rápida abertura da válvula com imediata liberação do agente extintor (ECKHOFF, 1997).

O mecanismo funciona da seguinte forma: com a explosão, ocorre um aumento de pressão no compartimento, o qual é detectado por sensores. Estes enviam um sinal elétrico responsável por abrir a válvula e liberar o supressor. Deve-se garantir que o bico aspersor tenha um design que permita a distribuição uniforme em todo compartimento.

As Figuras 23a-23e ilustram as etapas de operação de um sistema de supressão de explosão de poeira. A figura 23a representa o estado inicial do sistema, no exato momento em que ocorre a ignição, considerando-se pressão nula para melhor explicação. A partir da figura 23b, a explosão ocorre, provocando o surgimento da chama e de uma onda de pressão, que são percebidos pelos detectores do sistema de supressão.

Figura 23a. Primeira etapa da supressão Figura 23b. Segunda etapa da supressão



Fonte: Adaptado de Eckhoff (1997)

Fonte: Adaptado de Eckhoff (1997)

Na figura 23c, o supressor começa a ser liberado no compartimento, por meio do bico dispersor, e continua até a figura 23d. Até o momento, a pressão do compartimento continua subindo, sem, no entanto, alcançar a pressão máxima suportada pela estrutura, considerada 0,36 bar.

Por fim, a figura 23e marca o final da injeção de supressores, mostrando que a curva de pressão cai e o evento foi contido. Ainda nesta figura, é ilustrado o comportamento de um sistema análogo que, todavia, não foi suprimido. Neste caso, a curva de pressão cresce rapidamente, ultrapassando o limite suportado pela estrutura do recinto e alcançando valores de 5 a 10 bar, capaz de provocar grandes danos

Figura 23c. Terceira etapa da supressão



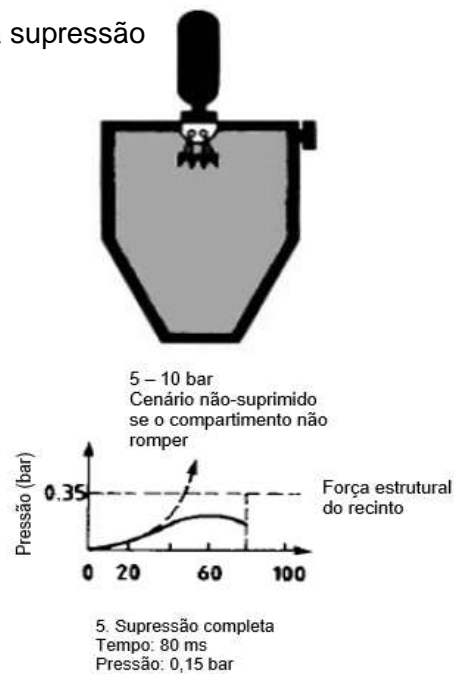
Fonte: Adaptado de Eckhoff (1997)

Figura 23d. Quarta etapa da supressão



Fonte: Adaptado de Eckhoff (1997)

Figura 23e. Final da supressão

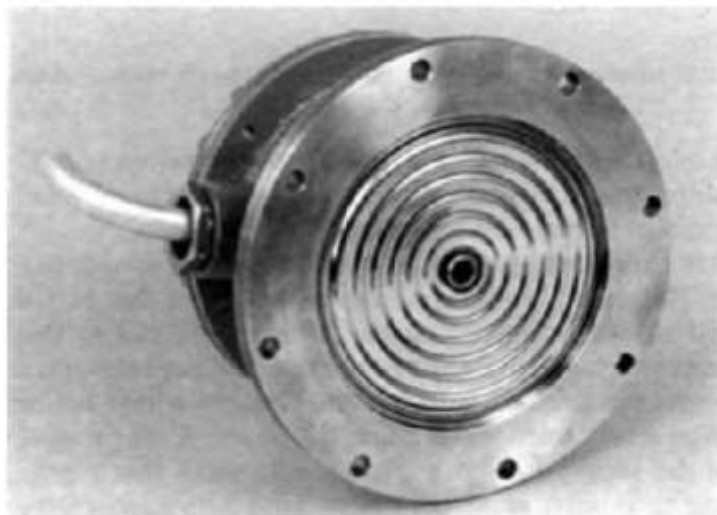


Fonte: Adaptado de Eckhoff (1997)

O supressor deve conter o agente extintor adequado (normalmente utilizam-se produtos químicos secos, como bicarbonato de sódio e fosfato monoamônico, ou água) e um gás propulsor, geralmente o nitrogênio a uma pressão na faixa de 60 a 120 bar (ECKHOFF, 1997). O detector de pressão é um aparelho extremamente sensível e, caso seja ajustado para ter alta sensibilidade, poderá ser acionado por leves variações de pressão provenientes de oscilações do processo. Isto pode gerar frequente abertura da válvula supressora por alarmes falsos e possível interrupção da produção. É importante, então, que a sensibilidade seja criteriosamente escolhida. Além disso, recomenda-se a utilização de dois detectores de pressão orientados a 90° entre si, pois essa disposição auxilia o sistema a identificar se o aumento de pressão é devido a explosões ou a outros distúrbios (ECKHOFF, 1997).

A Figura 24 mostra um detector de pressão do tipo membrana, um tipo comumente utilizado em sistemas automáticos de supressão de explosão de poeira.

Figura 24. Detector de pressão do tipo membrana



Fonte: Adaptado de Eckhoff (1997)

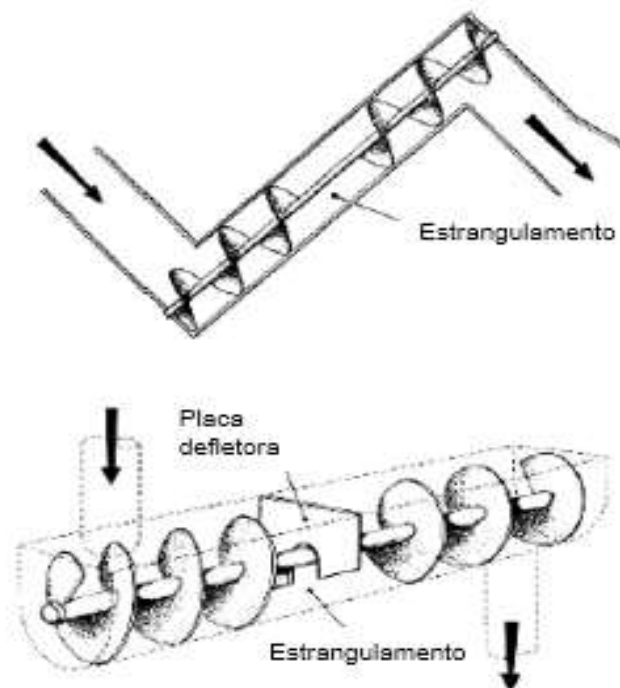
4.2.3 Isolamento

Devido ao fato de que as técnicas de supressão e de ventilação podem permitir que a chama se propague para fora do compartimento através de dutos ou tubulações, foi desenvolvida a técnica de isolamento. Este consiste na instalação de uma barreira entre a fonte da explosão e o processo, que se mantém protegido (GOING, LOMBARDO, 2007).

Os métodos de isolamento se dividem em duas categorias: os passivos, que não precisam ser ativados, e os ativos, que possuem detectores de chama ou de variação de pressão, os quais acionam um mecanismo de isolamento (ECKHOFF, 1997).

Um exemplo de isolamento passivo é o transportador de parafuso. Como ilustrado na figura 25, transportadores de parafuso funcionam como um tampão para o pó, constituindo um estrangulamento pelo qual a nuvem de poeira é capaz de atravessar, mas a chama não (WHEELER, 1935 apud ECKHOFF, 1997).

Figura 25. Transportador de parafuso



Fonte: Adaptado de Wheeler (1935) apud Eckhoff (1997)

Já o sistema de isolamento ativo busca gerenciar dois processos chaves: o tempo que o sistema precisa para detectar a explosão e construir a barreira e o tempo que a frente de propagação da explosão leva para alcançar essa barreira. A detecção deve ser ajustada para um valor de pressão previamente estabelecido. No entanto o tempo de atuação do sistema depende do tipo de processo: isolamento químico ou mecânico (GOING, LOMBARDO, 2007). Isolamento químico consiste na injeção de um agente extintor no duto antes da chegada da chama. Já o processo mecânico promove a criação de uma barreira física que impeça o avanço da chama, antes que ela chegue. (GOING, LOMBARDO, 2007).

Capítulo 5. Estudo de caso: Imperial Sugar Company

Neste capítulo será abordado o estudo de caso do acidente ocorrido na refinaria de açúcar da empresa Imperial Sugar, no estado da Geórgia, no Estados Unidos. O evento ocorreu em 7 de fevereiro de 2008 e foi responsável por 14 mortos e 38 feridos. A instalação foi varrida por uma série de explosões que se propagaram devido ao açúcar em pó depositado ao longo da fábrica. A descrição do evento aqui apresentada tomou como base o relatório oficial da investigação realizada pela Chemical Safety Board (CSB), órgão oficial de investigação do governo americano. A investigação foi feita através de entrevistas e coleta de evidências.

5.1 Sobre a empresa

Apesar de ter sido fundada em 1851, a Imperial Sugar Company nasceu com os irmãos Williams, que criaram em 1843 uma usina de açúcar movida a mulas ao longo das margens de Oyster Creek, Texas, nos Estados Unidos. Mais tarde, Oyster Creek se tornaria a Sugar Land, ou Terra do Açúcar, o que atraiu moradores, dentre os quais muitos imigrantes. Em 1940, com a Segunda Guerra Mundial, houve um racionamento de açúcar e outras restrições governamentais. Nesta época, a Imperial Sugar forneceu todo o açúcar para os estados do Texas e de Oklahoma, o que resultou no domínio da empresa nesses locais no pós-guerra (IMPERIAL SUGAR COMPANY, 2020).

A partir de 1989, a companhia adquiriu a Holly Sugar Corporation, composta por oito plantas de processamento de açúcar de beterraba, a Spreckels Sugar Company da Califórnia, uma empresa de açúcar de beterraba da Costa Oeste e, em 1997, a Savannah Foods & Industries, Inc., com sede em Savannah, na Geórgia, a qual na época era a segunda maior refinaria de açúcar do setor (IMPERIAL SUGAR COMPANY, 2020).

Em 2007, um ano antes do acidente, a empresa produziu mais de 1,3 milhão de toneladas de açúcar, constituindo-se uma das maiores refinarias de açúcar dos EUA. Na planta de Port Wentworth, na Geórgia, a produção anual ultrapassava 700 mil toneladas (CSB, 2009).

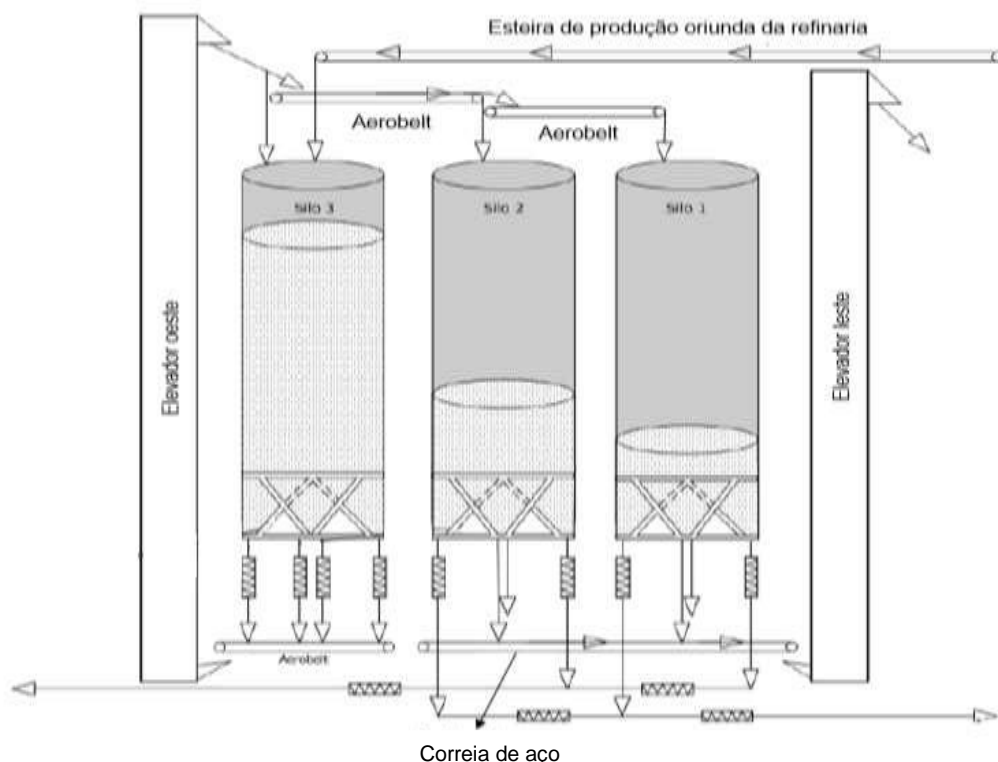
5.2 Área de processo

A planta de Port Wentworth começou a operar em 1917, com a produção de açúcar granulado. Com o passar dos anos, passou por aumento de capacidade de refino, armazenamento e embalagem. A fábrica recebia açúcar bruto e o refinava em açúcar granulado. Este poderia ser ainda transformado em açúcar em pó, açúcares especiais e produtos de açúcar líquido (CSB, 2009).

Os produtos eram vendidos em diversos tipos de empacotamento, desde sacos pequenos até os que comportavam 45 kg. A companhia vendia para padarias industriais, grandes cadeias de supermercados e pequenas mercearias (CSB, 2009).

O açúcar granulado era transportado pelos edifícios de embalagem por meio de transportadores de correia horizontais, parafusos sem fim e elevadores de caçamba. Conforme ilustrado na figura 26, esse açúcar era armazenado em três silos, que tinham 32 metros de altura. Primeiramente o material alimentava o silo 3 e depois era transferido para um transportador de correia contido em um túnel subterrâneo (CSB, 2009).

Figura 26. Sistema de movimentação entre os silos da Imperial Sugar



Fonte: Adaptado de CSB (2009)

O açúcar era, então, transportado verticalmente pelo elevador de caçamba e o despejava nas correias transportadoras tipo Aerobelt, que distribuíam o material para os silos 1 e 2 (figura 27). Estes, apresentavam duas saídas em seus fundos, cada uma apresentando 46cm de perímetro. Elas desembocavam em correias transportadoras de aço, também subterrâneas. A partir daqui, o açúcar granulado poderia ter três destinos: o empacotamento, carregamento de caminhões e trens, as usinas de açúcar em pó ou a produção de açúcares especiais (CSB, 2009).

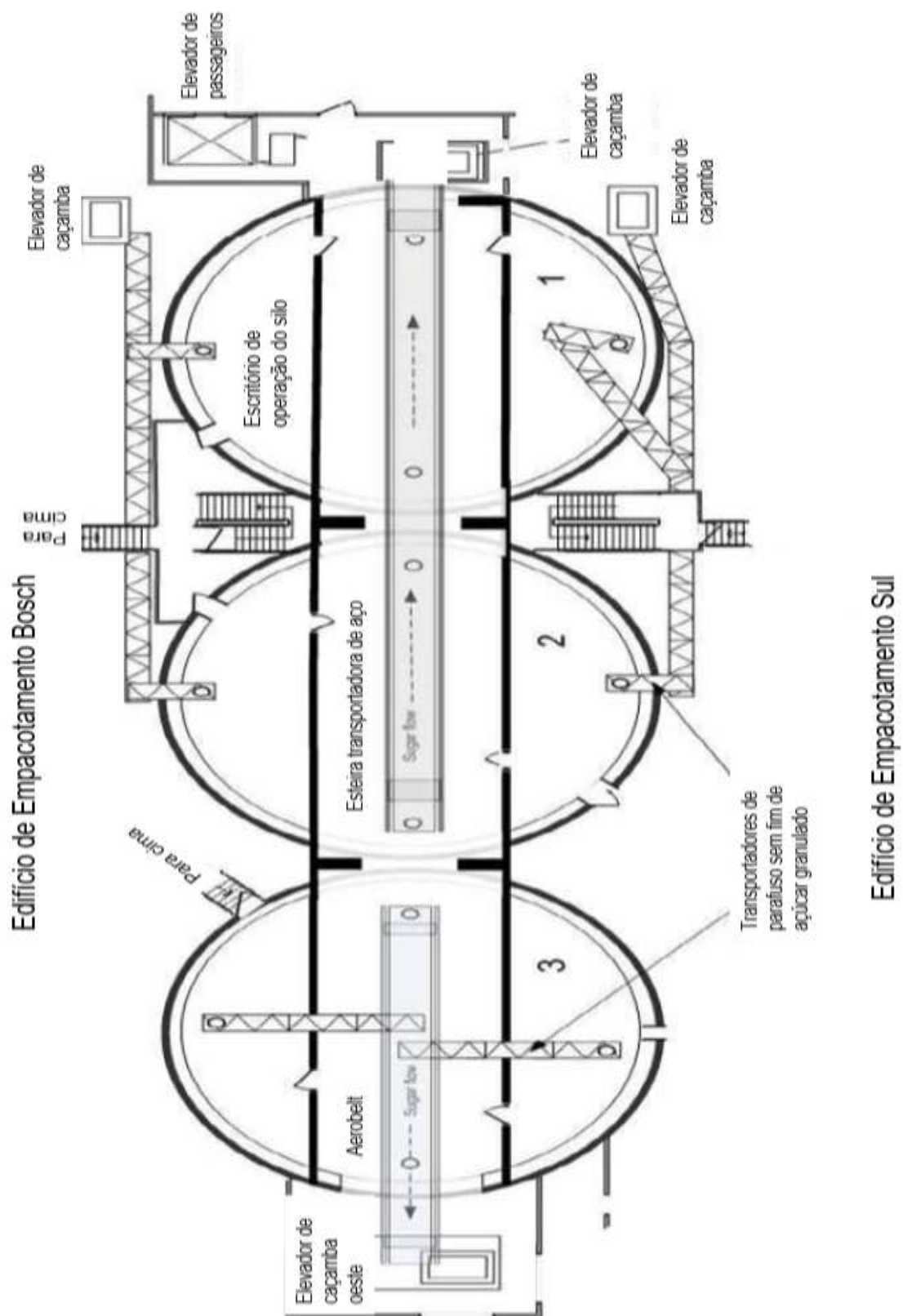
De acordo com a CSB, durante mais de 80 anos a refinaria manteve as correias de transporte abertas. Isto, porém, permitia contaminação do produto devido a detritos que poderiam cair enquanto o açúcar era transportado. Em 2007, a fim de proteger o produto, a Imperial Sugar decidiu cobrir completamente as correias transportadoras com uma estrutura de aço inoxidável. Havia painéis superiores e laterais, os quais eram removíveis para permitir limpeza e manutenção dos equipamentos. Essa modificação da estrutura dos transportes não abrangeu, contudo, a instalação de sistemas de remoção de pó nem respiradouros para aliviar possíveis explosões. Da mesma forma, os transportadores de parafuso sem fim também eram fechados, também não sendo equipados com removedores pó nem, tampouco, respiradouros (CSB, 2009).

5.3 Edifícios de empacotamento

A planta era composta por dois prédios de empacotamento: um localizado ao norte dos silos, este chamado de edifício Bosch, e outro localizado ao sul, chamado edifício Sul (CSB, 2009).

O edifício Bosch tinha quatro andares, em cujas laterais havia grandes portões. Através deles, pessoas e empilhadeiras tinham acesso ao prédio sul. A escada de aço fechada que conectava os quatro andares ficava localizada entre os silos 1 e 2. O açúcar granulado chegava ao prédio através de transportadores de correia e de elevadores de caçamba, e era logo direcionado à sala *hammer*, localizada no quarto andar. Lá, o material passava por peneiras, responsáveis por reter torrões de açúcar e selecionar determinadas faixas granulométricas.

Figura 27. Túnel abaixo dos silos



Fonte: Adaptado de CSB (2009)

Transportadores de parafuso sem fim transportavam o açúcar peneirado para o terceiro andar, onde adentrava nos alimentadores das empacotadeiras. Os alimentadores ficavam um andar acima das máquinas empacotadeiras, que se localizavam no segundo andar. O açúcar já embalado era então transportado até a sala do paletizador (CSB, 2009).

Assim como o edifício Bosch, o edifício sul também possuía quatro andares e uma escada de aço que permitia o trânsito entre os andares. A escada era fechada e se localizava entre os silos 1 e 2. No entanto, a zona ao extremo leste do prédio era aberta para regiões da refinaria, o que tornou necessária a instalação de cortinas de plástico nos corredores do edifício para dificultar a penetração de poeira (CSB, 2009).

Ainda segundo a CSB, no quarto andar se localizava o moinho que produzia açúcar em pó. O material ainda granulado chegava no local através de correias transportadoras e elevador de caçambas. Amido de milho era adicionado ao açúcar em pó, em uma concentração de cerca de 3%, e, por isso, este material era armazenado em um silo próprio, do qual era levado até alimentadores acima dos moinhos, por meio de uma tubulação pressurizada com ar. Os moinhos eram equipados com um sistema de coletores de pó, responsável por remover a suspensão gerada pela ação mecânica. Após a moagem, a mistura de açúcar com amido de milho já era descarregada nos alimentadores das máquinas empacotadoras.

Os equipamentos de empacotamento ficavam no segundo e terceiro andares. Eles embalavam açúcar granulado, em pó e mascavo. O produto já embalado era levado até a sala de paletizador através de correias e roletes. Alguns transportes passavam por aberturas nos pisos, cuja função era aliviar sobrepressões causadas por possíveis explosões (CSB, 2009).

5.4 O acidente

O acidente ocorreu no dia 7 de fevereiro de 2008, na unidade de fabricação de açúcar da Imperial Sugar Company em Port Wentworth, na Geórgia.

Segundo o documento da CSB, divulgado em 2009, a primeira explosão ocorreu por volta das 19h15 e teve origem nas correias transportadoras embaixo dos

silos. Segundos depois, foram propagadas explosões secundárias de poeira desde os edifícios de empacotamento e carregamento até a refinaria de açúcar bruto. A série de explosões foi capaz de dobrar os pisos de concreto dos lados sul e leste dos silos, e lança-los pelos quatro andares do prédio. Poucos minutos depois, o corpo de bombeiros de Garden City e Port Wentworth chegaram e se depararam com uma grande quantidade de detritos espalhados pelos prédios, totalmente envolvidos pelas chamas, uma densa fumaça e intenso calor. Durante mais de 15 minutos, saíram dos prédios grandes bolas de fogo, enquanto o pó de açúcar era disperso no ambiente e servia de combustível para alimentar as chamas (CSB, 2009).

Dos 135 funcionários presentes na planta no momento do acidente, oito morreram no local. Dentre estes, quatro ficaram presos nos destroços resultantes do desabamento. Outros dois trabalhadores morreram por terem entrado novamente no prédio tentando resgatar seus colegas, mas não conseguiram escapar. Trinta e seis funcionários feridos foram transportados para o Savannah Memorial Hospital, dentre os quais dezenove tiveram que ser transferidos para o hospital especializado em queimaduras Joseph M. Still Burn Center em Augusta, na Geórgia, por terem queimaduras graves. Mais tarde, seis destes funcionários faleceram, elevando o total de mortos para quatorze (CSB, 2009).

5.5 Investigação das causas do acidente

De acordo com as investigações, era comum que o açúcar se empedrasse na saída do silo 1 e ficasse alojado nos orifícios de descarga acima da correia de aço. Esses torrões de açúcar ficavam parcialmente para fora da tubulação de descarga e, assim, se tornavam uma barreira para a passagem do açúcar que continuava fluindo na correia proveniente do silo 2, como ilustrado na figura 28. O bloqueio da passagem provocava um acúmulo de açúcar naquela região do transportador, gerando dispersão do pó e derramamento de material no chão e em outras regiões do equipamento. Os trabalhadores relataram que o açúcar granulado derramado, ocasionalmente cobria o laço de retorno da correia e os rolamentos de apoio (CSB, 2009).

Figura 28. Empedramento de açúcar na saída do silo 1 servindo de barreira para passagem do açúcar (antes do fechamento da correia transportadora)



Fonte: Vídeo oficial da CSB

Os operadores normalmente acessavam esses locais de empedramento através das portas de acesso e utilizavam barras de aço para quebrar os torrões e liberar o fluxo da saída do silo. No entanto, durante esse processo poderiam se formar torrões menores que ficariam alojados na estrutura inferior da correia (CSB, 2009).

A CSB estima que durante o tempo em que a refinaria operava com as correias transportadoras abertas, a concentração de pó de açúcar provavelmente nunca ultrapassou a concentração mínima explosiva. Porém, uma vez fechada, o volume da esteira foi reduzido de 246m³ para aproximadamente 24m³ e não foram instalados coletores de pó. Ou seja, isso tornou possível que se alcançasse a concentração mínima explosiva dentro da correia transportadora. As figuras 29 e 30 ilustram o túnel de transporte subterrâneo antes e depois do fechamento das correias, respectivamente (CSB, 2009).

Figura 29. Túnel subterrâneo antes do fechamento da correia transportadora



Fonte: Vídeo oficial da CSB

Figura 30. Túnel subterrâneo após o fechamento da correia transportadora

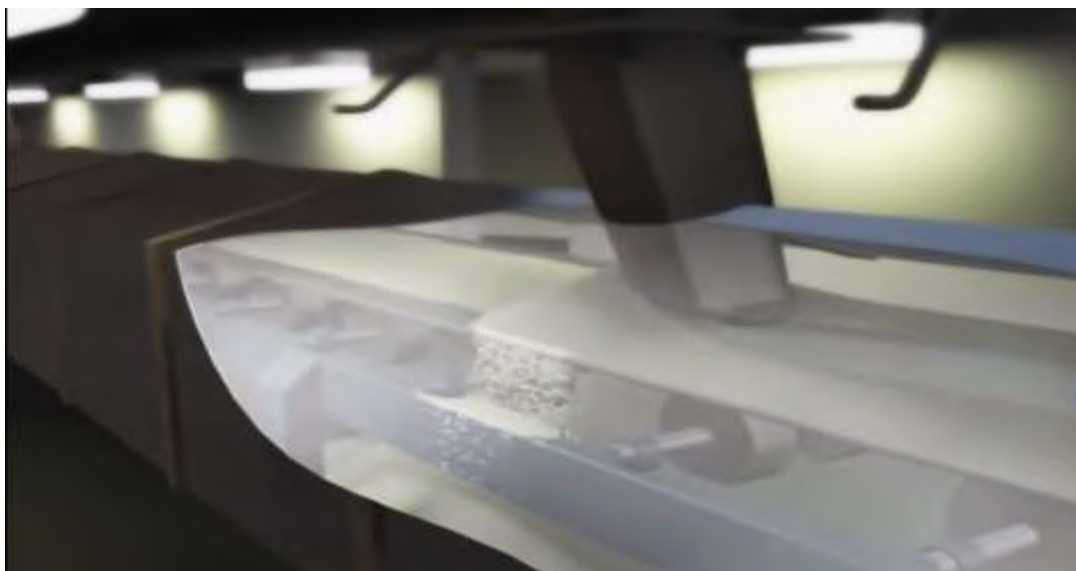


Fonte: Vídeo oficial da CSB

O que teria ocorrido, portanto, seria o empedramento do açúcar na saída do silo 1, gerando bloqueio e derramamento do material transportando, o que aumentou a concentração do pó no local. Como a correia estava com volume reduzido a 1 décimo, devido ao confinamento dos painéis de proteção, a concentração

mínima explosiva do material foi atingida, e alguma fonte de ignição atuou, provocando a explosão primária, como ilustra a figura 31 (CSB, 2009).

Figura 31. Empedramento de açúcar na saída do silo 1 servindo de barreira para passagem o açúcar (após o fechamento da correia transportadora)



Fonte: Vídeo oficial da CSB

A CSB (2009) coletou amostras do material e realizou uma série de experimentos para identificar a temperatura mínima de ignição de nuvens de poeira de açúcar. Segundo as análises, essas temperaturas variam de 360 ° C a 420 °C. Ao serem entrevistados pelos investigadores da CSB, os operadores disseram que os rolamentos da correia de aço às vezes funcionavam mal e "ficavam muito quentes". O rolamento quente dentro do transportador de correia constitui uma superfície quente, que, como já abordado anteriormente neste trabalho, pode ser uma fonte de ignição, principalmente se esta superfície mantiver contato direto com a nuvem de poeira por muito tempo. Segundo a CSB (2009), a explosão primária ocorreu devido à combinação do rolamento quente em contato com a nuvem de poeira de açúcar, que estava confinada na correia transportadora e sem ventilação.

As ondas de pressão geradas pela explosão romperam os painéis de cobertura da correia, projetando toda a estrutura para fora da extremidade leste do túnel.

A sobrepressão teria ainda atingido os silos, escadas e prédios de empacotamento (figura 32) (CSB, 2009).

Figura 32. Parede destruída e arremessada para o edifício de empacotamento da Imperial Sugar



Fonte: Adaptado de CSB (2009)

Outro agravante foi o acúmulo de pó de açúcar ao longo da fábrica, que teria ajudado a alimentar a explosão e o fogo (figuras 33 e 34). Segundo investigação da CSB (2009), havia grande liberação de pó de açúcar nas áreas de trabalho, visto que os elevadores de caçambas e transportadores de parafuso não eram devidamente vedados (CSB, 2009). .

Pouco tempo antes do acidente, a Imperial Sugar havia contratado um consultor externo para avaliar parâmetros dos sistemas de coleta de pó seco e úmido. O relatório foi entregue alguns dias antes do acidente, e identificou que o equipamento de coleta de poeira estava em mau estado, alguns equipamentos estavam significativamente subdimensionados ou foram instalados incorretamente. Na planta, foram encontrados trechos da tubulação de coleta de poeira parcialmente e até completamente cheios de pó de açúcar (CSB, 2009).

Figura 33. Acúmulo de material particulado próximo aos equipamentos de empacotamento



Fonte: Vídeo oficial da CSB

Figura 34. Acúmulo de material particulado próximo aos moinhos



Fonte: Vídeo oficial da CSB

Além disso, segundo a CSB (2009), as práticas de limpeza da planta não eram adequadas, o que resultava no acúmulo de pó de açúcar no local. Foi relatado pelos trabalhadores que suspensão e deposição de açúcar em pó nas áreas de processamento e embalagem eram problemas frequentes, e que era comum haver significativo acúmulo do material em equipamentos e no chão (figura 35). Um funcionário revelou ainda que limpava o depósito de açúcar no chão com um rodo, para chegar ao equipamento que operava durante o turno.

Figura 35. À esquerda, acúmulo de poeira no motor da correia transportadora do túnel (Imperial Sugar Co. foto de outubro de 2006) e à direita, amido de milho derramado abaixo de seu silo de armazenamento (Imperial Sugar Co, foto de março de 2008)



Fonte: Adaptado de CSB (2009)

O *housekeeping*, isto é, o conjunto de práticas de limpeza, foi tema da edição de janeiro de 2020 do boletim mensal de segurança do CCPS/AICHe. O documento reforça que tais práticas devem ir além da simples eliminação de derramamentos. Os equipamentos e as embalagens fora de uso precisam ser corretamente acondicionados. Sobre o acidente da Imperial Sugar, o boletim aponta que possivelmente os sistemas de segurança da planta não foram projetados para combustível adicional gerado por derramamento de material particulado (CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY, 2020).

No que diz respeito ao treinamento dos funcionários, segundo a CSB (2009), ele era realizado sempre no primeiro dia de trabalho do colaborador e, após isso, eram feitas reciclagens anuais, que normalmente ocorriam no mês de aniversário do funcionário. De acordo com os entrevistados, no entanto, nem

todos os operadores estavam em dia com seus treinamentos. Além disso, constatou-se uma retenção mínima dos tópicos abordados no treinamento: enquanto alguns funcionários afirmaram que o risco de acúmulo de poeira foi mencionado em algum momento das sessões, a CSB verificou mais de dez mil páginas de testes aplicados relativos ao treinamento e não encontrou nenhuma informação referente ao assunto desde 2005.

Os investigadores coletaram amostras do açúcar e do amido de milho na planta e realizaram todos os testes de caracterização. Os dados obtidos são apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Resultados obtidos a partir do material coletado da planta de Port Wentworth

Material	Conteúdo de umidade (peso%)	Tamanho de partícula (μm)	Pmax (bar)	Kst (bar *m/s)	MEC (g/m ³)	MIE (mJ)
Amido de Milho	11,5	10,0	8,5	189,0	105,0	10 < MIE < 30
Açúcar em pó	0,5	23,0	7,5	139,0	95,0	10 < MIE < 30
Açúcar granulado (como recebido)	0,1	Não determinado	5,2	35,0	115,0	MIE > 1000
Açúcar granulado (peneirado a < 500 micrômetros)	0,1	286,0	6,0	56,0	115,0	MIE > 1000

Fonte: Adaptado de Ebadat (2013)

A CSB (2009) avaliou também o plano de resposta a emergências implementado na fábrica. Em entrevista, os trabalhadores relataram que a comunicação ocorria através de rádios e telefones celulares, utilizados por algumas pessoas, o que gerou graves consequências na noite do acidente. Como não havia dispositivos de alarme sonoro ou visual na planta, alguns operadores não tinham como ser alertados sobre uma notificação imediata, em caso de emergência. A Imperial Sugar chegou a publicar rotas de evacuação de emergência, porém não treinou a equipe, o que dificultou a saída dos funcionários do prédio após as explosões.

A estrutura de equipamentos de emergência da planta também foi avaliada pela investigação da CSB (2009). Luzes de emergência e sinais de saída luminosos, embora instalados por toda a fábrica, não surtiram o efeito esperado, pois alguns

desses equipamentos apresentaram mau funcionamento devido aos danos gerados pelas explosões e incêndios. Dessa forma, as luzes que resistiram aos danos não forneciam a luminosidade suficiente para auxiliar na fuga dos funcionários. Da mesma maneira, a tubulação de supressão de incêndio foi danificada, provocando baixo fluxo de água dos hidrantes locais, prejudicando o combate às chamas.

5.6 Análise do caso

Por meio das informações obtidas durante a investigação, é possível afirmar que houve uma série de falhas na avaliação de riscos da Imperial Sugar. O primeiro ponto a se destacar é o projeto inicial da planta, que começou a operar em 1917. A fábrica possuía um sistema de coletor de pós conectado aos moinhos de açúcar, no entanto, este era subdimensionado, não sendo eficiente para adequada remoção da poeira. Tal sistema, no entanto, não estava conectado às correias transportadoras, aos elevadores de caçamba nem aos transportadores de parafuso sem fim. As correias transportadoras operavam dentro de um túnel abaixo dos silos, equipado com sistema de ventilação. Durante 80 anos a planta operou, apresentando poucas ocorrências de pequenos incêndios, que eram rapidamente contidos pelos funcionários. Verifica-se, portanto, que o dimensionamento dos equipamentos e desenho da planta devem ser criteriosamente realizados antes da construção da mesma. No caso da planta de Port Wentworth isso não foi feito, o que aumentou a probabilidade de ocorrência de acidentes. O sistema de coleta de pós, por exemplo, deveria contemplar todos os ambientes que apresentassem presença de pó de açúcar.

Nove meses antes do acidente, foram instalados painéis de cobertura da correia transportadora que passava pelo túnel subterrâneo abaixo dos silos. Essa nova estrutura ocasionou aumento da concentração de poeira no local, que, como abordado no capítulo 3, facilita a ocorrência de explosões, pois eleva a quantidade de poeira combustível disponível. Mesmo que a quantidade de açúcar transportada tivesse se mantido e que não tivesse ocorrido nenhum derramamento, apenas o fato de reduzir o volume da área confinada já teria aumentado a concentração. Isto porque concentração é a razão entre massa e

volume. Ou seja, ao reduzir o denominador, aumenta-se o valor final e, consequentemente, a probabilidade de atingir a mínima concentração explosiva. Com a inserção da cobertura da correia transportadora, a área de confinamento foi reduzida à um décimo, uma redução significativa. O açúcar transportado pela correia não estava mais confinado ao espaço do túnel, mas sim ao espaço delimitado por painéis de aço inoxidável. Além disso, a nova estrutura não foi equipada com sistemas de ventilação e coletores de pó, como existia no túnel anteriormente, de modo a compensar a enorme redução do volume de confinamento.

Sempre que houver alguma modificação estrutural ou operacional, deve-se reavaliar os riscos. O fechamento da correia transportadora constituiu uma modificação estrutural. No entanto, não foi feita nenhuma reavaliação de riscos da nova estrutura da planta.

Como agravante, houve ainda o derramamento de material causado pela barreira de açúcar empedrado na descarga do silo 1. Antes da cobertura da correia transportadora, esse derramamento de açúcar era visível para os empregados, que procuravam formas de quebrar os torrões de açúcar para desentupir a descarga do silo, interrompendo o derramamento. Porém, com o fechamento da correia transportadora, o entupimento não era mais visível, fazendo com que o material derramado se acumulasse. Ao derramar, as partículas de açúcar ficavam em suspensão no local, criando uma nuvem de poeira no interior da cobertura de aço. Dessa forma, neste trecho onde se situava a saída do silo 1, houve formação do cenário ideal para ocorrência de uma explosão: material particulado combustível, em concentração significativa, em suspensão e confinado, juntamente com o oxigênio do ar (comburente). Para completar o pentágono de explosão, era necessária apenas uma fonte de ignição, que acabou surgindo a partir do aquecimento dos rolamentos da correia transportadora.

Ao longo do tópico 3.3, foram apresentadas fontes de ignição, dentre as quais, superfícies quentes. De acordo com Atkins e Jones (2012), a energia interna de um sistema varia de acordo com a variação de calor e de trabalho. Um sistema com temperatura mais alta tem sempre maior energia interna do que este mesmo sistema em temperatura mais baixa (ATKINS, JONES, 2012). O

superaquecimento dos rolamentos das correias transportadoras teria transferido calor para a nuvem de açúcar, que se aqueceu. Isto teria provocado a ignição e a consequente explosão.

Além do projeto estrutural inicial (dimensionamento da planta), a sua manutenção também é de suma importância. É por meio da manutenção que se controla o efeito das variáveis do processo e do ambiente, mitigando os riscos na área de processo. Alguns desses procedimentos são: lubrificação, calibração e revisão dos equipamentos, e rotinas de limpeza. Operadores relataram que por vezes os rolamentos ficavam quentes. No entanto, não foi realizada nenhuma manutenção no equipamento para verificar e sanar este problema.

Durante as investigações, foi relatada também a presença frequente de depósitos de poeira espalhados pelas superfícies das instalações. Estes acúmulos, quando suspensos, formaram novas nuvens de poeira, gerando explosões secundárias. No item 4.1.2 deste trabalho, assim como no boletim de segurança do CCPS de janeiro de 2020, foi abordada a importância das práticas de limpeza como método preventivo, que não era devidamente empregada na planta da Imperial Sugar Company em Port Wentworth. Foi relatado ainda que a limpeza ocorria muitas vezes por meio a aspersão de ar comprimido, o que dispersava o material particulado no ambiente. A NFPA 61 (2008) enfatiza que a utilização de ar comprimido para limpeza não é recomendada, podendo ser utilizada apenas quando todas as fontes de ignição da área estiverem desligadas. Ou seja, fica claro que a empresa não treinou adequadamente seus funcionários nos riscos de explosões com pós, o que foi confirmado pela investigação do material utilizado nos treinamentos. É essencial que os funcionários conheçam os riscos aos quais estão expostos, bem como, saibam maneiras de mitiga-los. Além disso, é fundamental que a gerência divulgue e valorize o tema, buscando sempre incentivar e cobrar práticas seguras.

No que diz respeito aos métodos de redução de danos instalados na planta, estes eram escassos e inadequados. O sistema de ventilação, como verificado pouco antes do acidente, era ineficiente, não sendo capaz de transportar para fora do prédio o material particulado. A planta não era equipada com tecnologias de supressão, ventilação por alívio, tampouco isolamento. Ou seja, a fábrica apresentava métodos preventivos ineficazes e nenhuma técnica corretiva. Os

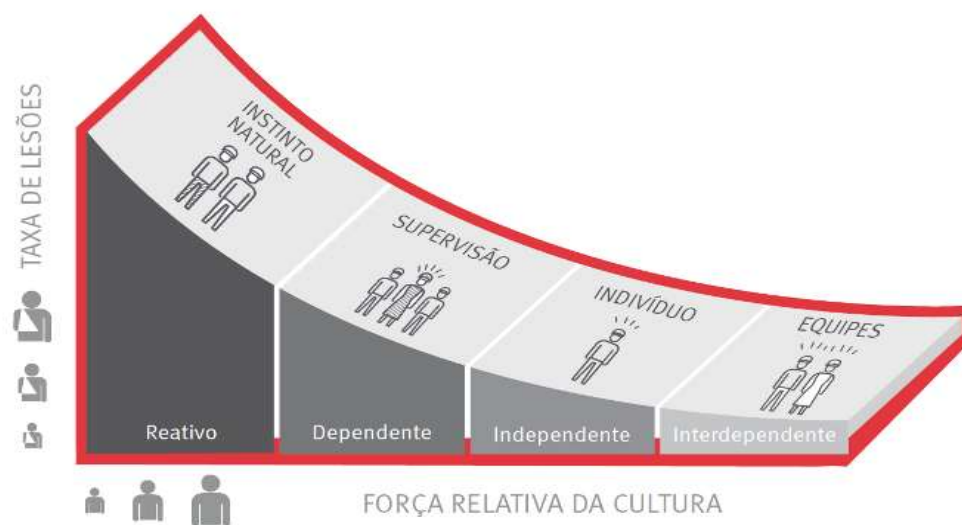
métodos de resposta ao acidente também não se mostraram eficientes, pois o sistema de iluminação de emergência falhou, prejudicando a evacuação dos funcionários. Foi relatado ainda aos investigadores que não havia um sistema de comunicação de emergências, o que também teria retardado e dificultado a evacuação.

Uma cultura de segurança sólida poderia ter evitado tal acidente. Tal cultura deveria envolver uma rotina regular de manutenção e *housekeeping* (práticas de limpeza), treinamento dos funcionários, melhor planejamento estrutural da planta e instalação de tecnologias de segurança adequadas. A realização de manutenção preventiva poderia, por exemplo, ter identificado a causa dos recorrentes empedramentos de açúcar na saída do silo 1, bem como uma possível anomalia geradora do superaquecimento dos rolamentos da correia transportadora. A instalação de um sistema de ventilação por exaustão na estrutura de painéis de aço ao redor das correias transportadoras poderia ter evitado o acidente, pelo fato de reduzir a concentração de combustível no ambiente. De modo análogo, um sistema de purga e inertização também poderia ter reduzido as chances de ocorrência do acidente, uma vez que diminuiria a concentração de comburente disponível.

Existiam, portanto, uma série de condutas com potencial de evitar o acidente. Todas elas se resumem, no entanto, a uma cultura de segurança sólida implementada na empresa. É fundamental que ela seja reforçada sempre pelos líderes da planta, de modo a incentivar a discussão de todos sobre o tema. A curva de Bradley, ilustrada na figura 36, é uma forma excelente de monitoramento da consistência da cultura de segurança na empresa, uma vez que relaciona a taxa de lesões com a força da cultura. A finalidade é que a cultura de segurança seja aplicada naturalmente na rotina dos funcionários, não porque seja uma cobrança dos líderes, mas sim porque os funcionários compreendem a importância das práticas seguras.

É possível compreender, portanto, a relevância dos assuntos abordados por este trabalho, visto que todos os pontos apresentam embasamento e aplicação prática em um acidente de grandes proporções. Ao longo deste trabalho foi possível justificar as falhas encontradas na investigação do caso da Imperial Sugar, e entender as condições das explosões.

Figura 36. Curva de Bradley



Fonte: www.segurançadotrabalhonwn.com/curva-de-bradley

6. Conclusão

Ao longo deste trabalho foram apresentados os conceitos de incêndios e explosões, focando em explosões com pós, a partir de uma revisão bibliográfica. Foram explicados o mecanismo destes eventos, assim como os fatores que influenciam a probabilidade de sua ocorrência.

Métodos de redução de danos foram abordados, contemplando desde o momento de projeto da planta, até o monitoramento diário e frequente dos parâmetros de processo.

Foi descrito o acidente ocorrido na Imperial Sugar Company, em 2008, no Estados Unidos. A partir do relatório oficial de investigação emitido pela Chemical Safety Board (CSB), foram identificadas como possíveis causas:

- O empedramento de açúcar na saída do silo 1, causando obstrução na transportadora de correias e consequente derramamento de açúcar no local;
- A intensificação do confinamento, causada pela instalação de painéis de cobertura da transportadora de correias;
- O possível superaquecimento dos rolamentos da correia, fornecendo fonte de ignição.

As possíveis causas identificadas pela CSB foram analisadas e relacionadas com os fatores de influência previamente abordados no trabalho:

- O empedramento de açúcar na saída do silo 1 e gerou aumento da concentração de combustível disponível no local.
- Derramamento de açúcar da correia gerou dispersão do pó combustível
- A intensificação do confinamento facilitou o alcance da concentração mínima explosiva na região.
- O provável superaquecimento dos rolamentos da correia transportadora forneceu ignição ao sistema.

Por fim, foram apresentadas condutas que poderiam ter minimizado os danos gerados pelo acidente ou até evitado sua ocorrência. Algumas delas são: rotina de manutenção, rotina de limpeza, instalação de tecnologias de segurança e

treinamento dos funcionários. Tais condutas fazem parte de uma cultura de segurança sólida, que é fundamental para o correto funcionamento de uma empresa.

Referências

AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Housekeeping is more than « pretty » - it's about safety. **Process Safety Beacon**. Disponível em < <https://www.aiche.org/ccps/process-safety-beacon>>. Acesso em: Jan. 2020.

AMYOTTE, P. R.; ECKHOFF, R. K. Dust explosion causation, prevention and mitigation: an overview. **Journal of Chemical Health and Safety**, v. 17, n. 1^a, p. 15-28, Janeiro 2010.

ATKINS, P.W.; JONES, Loretta. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 924 p.

A. A. Van der Dussen. Dust explosions, **Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas**. Vol. 55, 1936, p. 873-884.

BHANDARI, B. Introduction to food powders. In :_____. **Handbook of Food Powders**, 1 ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 2013. Cap1

BARTKNECHT, W. Pressure Venting of Dust Explosions in Large Vessels. **Plant/Operations Progress**, v. 5, n. 4, p.196-204, out. 1986.

BENSON, J.M. Safety considerations when handling metal powders. **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v.7, p.563-575, jul.2012.

BLAIR, Angela S. Dust explosion incidents and regulations in the United States. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 20, p. 523-529, março 2007.

BRAGA, Kátia Soares. Aspectos relevantes para a seleção de metodologia adequada à pesquisa social em ciência da informação. In:____. MUELLER, Suzana Pinheiro Machado (org.). **Métodos para a pesquisa em ciência da informação**. Brasília, DF: Thesaurus, 2007.

BRITTON, Laurence G. et al. The Role of ASTM E27 Methods in Hazard Assessment Part II: Flammability and ignitability. **Process Safety Progress**, v.24, n.1, p.12-28, mar.2005.

BRITTON, Laurence G.; HARRINSON, Benjamin Keith. Minimum Explosible Concentrations of Mist and Dust Clouds. **Process Safety Progress**, v.37, n.1, p.4-17, mar. 2018.

BUCKA. Combate a incêndio. 2019. Disponível em: < <http://www.bucka.com.br>>. Acesso em: dez. 2019.

BULGARELLI, Roberval. Eletricidade estática em atmosferas explosivas – Riscos, controle e mitigação – Parte 03/08. Portal O Setor Elétrico, 2019.

Disponível em: < <https://www.osetoreletrico.com.br/eletricidade-estatica-em-atmosferas-explosivas-riscos-controle-e-mitigacao-parte-01-05/>>. Acesso em: dez/2019.

CALAZANS, Angélica Toffano Seidel. Estudo de caso - uma estratégia de pesquisa. In _____. MUELLER, Suzana Pinheiro Machado (org.). **Métodos para a pesquisa em ciência da informação**. Brasília, DF: Thesaurus, 2007.

CHIBBARO, Mat. Preplanning Dust Explosion Hazards. **Fire engineering**, p.77-80, jun.2014. Disponível em: < <http://digitalfireengineering.com>>. Acesso em: dez.2019.

CROWL, Daniel A; LOUVAR, Joseph. **Chemical process safety : fundamentals with applications**. 2. ed., New Jersey: Prentice Hall, 2002.

CROWL, D. A. **Understanding Explosions**. New York: CCPS Concept book, 2003.

CSB. Sugar Dust Explosion and Fire - Imperial Sugar Company, Port Wentworth. Investigation Report, 2009.

EBADAT, V. Ensuring process safety in food powder Ensuring process safety in food powder production: the risk of dust explosion. In : _____. **Handbook of Food Powders**, 1 ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 2013. Cap11

ECKHOFF Rolf K. **Dust Explosions in the Process Industries**. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

Ecosafety. Engenharia de incêndio. Disponível em: <<http://www.ecosafety.com.br/fm-200>>. Acesso em: dez. 2019.

FERNANDES, Marcelo Eloy; NAMBA, Camila Eiko Yazawa; GOZZI, Marcelo Pupim. Estudo de prevenção de acidentes por explosões verticais para abastecimento de cereais. In Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 31, 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABEPRO, 2011, p.1-13.

Fike Corporation (FIKE). Disponível em: <<http://www.fike.com>>. Acesso em: jan. 2020.

FRANK, Walter L. Dust Explosion Prevention and the Critical Importance of Housekeeping. **Process Safety Progress**, Wilmington, v.23, n.3, p.175-184, set. 2004.

FRURIP, David et al. The Role of ASTM E27 Methods in Hazard Assessment Part I: Thermal Stability, Compatibility, and Energy Release Estimation Methods. **Process Safety Progress**, v.23, n.4, p.266-278, dez.2004.

GOING, John E.; LOMBARDO, Tony. Dust Collector Explosion Prevention and Control. **Process Safety Progress**, v.26, n.2, p.164-176, jun. 2007.

IMPERIAL SUGAR COMPANY. Disponível em: <www.imperialsugar.com>. Acesso em: jan. 2020.

LEES, Frank P. **Loss prevention in the process industries: hazard identification assessment and control**. v.2, 2.ed.rev., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.

MYERS, Timothy J.; IBARRETA Alfonso F. Tutorial on Combustible Dust. **Process Safety Progress**, v.32, n.3, p.298-306, set.2013.

MUNDO EDUCAÇÃO. Disponível em <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br>>. Acesso em: jan. 2020.

NFPA. Guide for Fire and Explosion Investigations. National Fire Protection Association. USA. 2019.

NFPA 61. Standard for prevention of fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Processing Facilities. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA. 2008.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA). U.S. Department of labor. Disponível em: <<http://www.osha.gov>>. Acesso em: dez.2019.

PAK, Seonggyu et al. Case Studies for Dangerous Dust Explosions in South Korea during Recent Years. **Sustainability**, v. 11, n. 4888, set. 2019.

PIZZANI, Luciana et al. A arte da pesquisa bibliográfica na busca do conhecimento **Rev. Dig. Bibl. Ci. Inf.**, Campinas, v.10, n.1, p.53-66, jul./dez. 2012.

PROUST, C. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Cracow, v. 19, n. 2^a, p. 104-120, Mar.2005.

RANGEL JR, Estellito. Os pós: Lobo em pele de Cordeiro. Portal O Setor Elétrico, 2019. Disponível em:< <https://www.osetoelettrico.com.br/eletricidade-estaticaem-atmosferas-explosivas-riscos-controle-e-mitigacao-parte-01-05/>>. Acesso em: dez/2019.

RIBERAU-GAYON, R. Les risques de poussières dans le stockage agroalimentaire : les risques d'accident catastrophique et leurs conséquences médicales. **Médecine de Catastrophe – urgences collectives**, Périgueux, v. 3, n. 1, p. 13-20. Mar 2000.

RICHTER, Steven M. Collective Analysis of Pharmaceutical Dust Explosion Testing Data. **Process Safety Progress**, v.31, n.2, p.165-169, jun.2012.

SEGURANÇA DO TRABALHO. Disponível em:

<www.segurancadotrabalho.gov.br/curva-de-bradley>. Acesso em jan. 2020.

SICHEL, M.; KAUFFMAN, C. W.; Li, Y. C. Transition from Deflagration to Detonation in Layered Dust Explosions. **Process Safety Progress**, v.14, n.4, p. 257-265, out.1995.

SMITH, J.M.; VAN NESS H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 7.ed., Rio de Janeiro: LTC, 2013.

THEIMER, O. F. Cause and prevention of dust explosion in grain elevator and flour mills. **Powder technology**, Lausanne, 1972.

VOELKERT, J.Craig. Fire and fire extinguishment. A brief guide to fire chemistry and extinguishment theory for fire equipment service technicians. 2009, rev. 2015. Disponível em:< <https://www.amerex-fire.com/upl/downloads/educational-documents/fire-and-fire-extinguishment-99cd88b2.pdf>>. Acesso em: dez.2019.

VORDERBRUEGGEN, John B. Imperial sugar refinery combustible dust explosion Investigation. **Process Safety Progress**, Washington, v.30, n.1, p.66-81, mar. 2011.

W. P. M. Matla. Dust explosions, **Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas**. Vol. 55, 1936, p. 173-191.

YAN, Xing-Qing; YU, Jian-Liang. Dust Explosion Incidents in China. **Process Safety Progress**, v. 31, n. 2, p. 187-189, jun. 2012.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Tradução de Daniel Grassi. 3.ed., Porto Alegre: Bookman, 2005.

Anexo A – Parâmetros de pós alimentícios comuns

Produto	Explosível?	P_{max} (bar)	K_{st} (bar·m/s)	MIE (mJ)	MIT- Nuvem (°C)	MEC (g/m ³)
Milho	Sim	6.5	112	45–100	390–400	73
Trigo	Sim	7.4	87	50–100	370–380	67
Aveia	Sim	7.2	43	>500	420–430	30
Cevada	Sim	6.3	100	50–100	360–370	73
Soja	Sim	9.2	110	50–100	600–620	80
Amido de arroz	Sim	10.0	220	>30	460–470	60
Amido de trigo	Sim	9.1	156	10–30	470–480	30
Açúcar	Sim	9.0	138	<10	470–480	30

Fonte: Adaptado de Ebadat (2013)

Nota: Os valores aproximados citados na Tabela acima não devem ser utilizados para a determinação de medidas de prevenção e/ou proteção contra explosão. Fatores como método do teste, composição, tamanho de partícula e teor de umidade podem afetar os resultados. A avaliação de risco da poeira combustível deve ser realizada por meio de dados reais de teste com uma amostra representativa do seu próprio processo.